

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Journal for Photogrammetry, Remote Sensing
and Geoinformation Science

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

Jahrgang 2014, Heft 1

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse

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

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



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2014



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:

© 2014 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Präsident: Prof. Dr. Thomas Kolbe, Technische Universität München, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Lehrstuhl für Geoinformatik, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany, Tel. +49-89-289-23888
Geschäftsstelle: Tanja Nyc, c/o Technische Universität München, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Lehrstuhl für Geoinformatik, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany, Tel.: +49-89-289-22578, e-mail: geschaeftsstelle@dgpf.de

Published by: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart, Germany, Tel.: +49-711 351456-0, Fax: +49-711 351456-99, e-mail: mail@schweizerbart.de
Internet: <http://www.schweizerbart.de>

© Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

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

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

Verantwortlich für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren.

ISSN 1432-8364

Science Citation Index Expanded (also known as SciSearch®) Journal Citation Reports/Science Edition
Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse, Hochschule Neubrandenburg, Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik, Brodaer Straße 2, 17033 Neubrandenburg, Germany, e-mail: kresse@hs-nb.de
Schriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz, Karlsruher Institut für Technologie – KIT, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe, Germany, e-mail: stefan.hinz@ipf.uni-karlsruhe.de, Privatdozent Dr. techn. Franz Rottensteiner, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, Germany, e-mail: rottensteiner@ipi.uni-hannover.de, Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Michel, Pädagogische Hochschule Heidelberg, Czernyring 22/11–12, 69115 Heidelberg, Germany, e-mail: michel@ph-heidelberg.de, Prof. Dr. rer. nat. Lars Bernard, Technische Universität Dresden, Fachrichtung Geowissenschaften, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, Germany, e-mail: lars.bernard@tu-dresden.de, und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam, Germany, e-mail: eckhardt.seyfert@geobasis-bb.de

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 229,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos. Der Online-Zugang ist im regulären Subskriptionspreis enthalten.

Anzeigenverwaltung: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart, Germany, Tel.: +49-711 351456-0; Fax: +49-711 351456-99.
e-mail: mail@schweizerbart.de, Internet: <http://www.schweizerbart.de>

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

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

PFG – Jahrgang 2014, Heft 1

Inhaltsverzeichnis

Originalbeiträge

SCHLICHTING, A., BRENNER, C. & SCHÖN, S.: Bewertung von Inertial/GNSS-Modulen mittels Laserscannern und bekannter Landmarken	5
STERN, O., PASCHMIONKA, B., STOFFELS, J., BUDDENBAUM, H. & HILL, J.: Abbildende und nichtabbildende Geländespektrometrie zur Untersuchung von Stressphänomenen an Buchenpflanzen	17
RAMZI, P., SAMADZADEGAN, F. & REINARTZ, P.: An AdaBoost Ensemble Classifier System for Classifying Hyperspectral Data	27

Beiträge aus Wissenschaft und Praxis

VETTER, M. & MANDLBURGER, G.: Modification of High Resolution Airborne Laser Scanning DTMs for Drainage Network Delineation	41
LINCK, R., BUSCHE, T. & BUCKREUSS, S.: Visual Analysis of TerraSAR-X Backscatter Imagery for Archaeological Prospection	55

Mitteilungen

Berichte von Veranstaltungen 54 th Photogrammetric Week, 9 th –13 th September 2013, Stuttgart	67
Hochschulnachrichten Leibniz Universität Hannover, Dissertation Muhamad Nasir A. Alrajhi.	70
Leibniz Universität Hannover, Dissertation Antje Thiele	71
Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation Daniela Richter	72
Technische Universität Dresden, Dissertation Emil Bayramov	73
Technische Universität Dresden, Dissertation Robert Hecht	74
Technische Universität Dresden, Dissertation Christina Eisfelder	75
Nachruf auf FRANZ JOSEF HEIMES	77
Unmanned Aerial Systems (UAS) Mitteilung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	78
Mitteilung aus der Normungsarbeit des DIN	80
Neuerscheinungen	81
Veranstaltungskalender	81
Korporative Mitglieder	82

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



Bewertung von Inertial/GNSS-Modulen mittels Laserscannern und bekannter Landmarken

ALEXANDER SCHLICHTING, CLAUS BRENNER & STEFFEN SCHÖN, Hannover

Keywords: mobile mapping, inertial navigation system, laser scanner, segmentation, landmarks

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Bewertung von Inertial/GNSS-Sensoren in einem mit Laserscannern ausgestatteten Mobile-Mapping-System vorgestellt. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Genauigkeit der Position und Verdrehung. Zu deren Beurteilung wurde ein Algorithmus entwickelt, mit welchem Landmarken aus einer Punktwolke segmentiert und anschließend Referenzlandmarken zugeordnet werden. Die Abweichungen zwischen den segmentierten Landmarken und den korrespondierenden Referenzen geben Aufschluss über die äußere Genauigkeit des Gesamtsystems. Die Wiederholgenauigkeit wird anhand der Streuung der Abweichungen bestimmt. Durch die Erzeugung relativ großer Orientierungswinkel und Drehraten auf einer Rampe (Nick- und Roll-Winkel) wird außerdem die Genauigkeit der Verdrehung bestimmt. Das entwickelte Bewertungskonzept wird anschließend gleichzeitig auf drei verschiedene Inertial/GNSS-Kombinationen angewendet. Durch die simultane Messung lassen sich damit die Genauigkeitswerte der verschiedenen Systeme vergleichen.

Summary: *Evaluation of inertial measurement systems using laser scanners and known landmarks.* In this paper we present an approach for evaluating inertial/GNSS sensors using a mobile mapping system with laser scanners. We focus on the accuracy and precision of the absolute and relative position and alignment. The main approach is to detect specific pole-like landmarks in the point cloud, whose absolute position is known with high accuracy. An important evaluation factor is the position deviation between the segmented poles and the corresponding landmarks. This provides information on the accuracy of the system. The system precision is obtained by the scatter of the deviations. To evaluate the precision of the alignment, we generated relatively large orientation angles (several degrees) and angular rates (several degrees per second) by driving over a ramp (pitch and roll angle). This approach is applied to three integrated inertial/GNSS systems in parallel. Since the systems were operated simultaneously, we are able to compare their precision and accuracy.

1 Einleitung

Mobiles Laserscanning erlaubt die Erfassung großer Datenmengen innerhalb kurzer Zeit. Mit den Aufnahmen einer einzelnen Messfahrt können beispielsweise 3D-Stadtmodelle erstellt oder Objekte des Straßenraums kartographisch erfasst werden. Mobiles Laserscanning bietet somit im Vergleich zu herkömmlichen, statischen Messverfahren eine hohe Steigerung der Effizienz.

Um die während der Fahrt aufgenommenen Punkte direkt mit Koordinaten eines einheitlichen, globalen Koordinatensystems zu ver-

sehen, ist es notwendig, kontinuierlich die lokale Position und Orientierung (Pose) des Fahrzeuges zu bestimmen. Zur Bestimmung der Pose werden in der Regel mit GNSS gekoppelte inertielle Messeinheiten (IMU) verwendet. Die Verwendung eines Inertial/GNSS-Systems bietet den Vorteil, dass die Kurzzeitstabilität der Inertialeinheit mit der Langzeitstabilität des GNSS kombiniert werden kann. Darüber hinaus liegen durch die GNSS-Messungen globale Koordinaten vor.

Im Zuge der Sensorauswahl eines mit Laserscannern ausgestatteten mobilen Messsystems stellt sich die Frage, welche Inertial/

GNSS-Sensorik für bestimmte Anwendungen geeignet ist. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich damit, die Eignung von mit GNSS gekoppelten inertialen Messsystemen für das Mobile-Mapping mittels eines Testfelds festzustellen. Dies ist vergleichbar mit Untersuchungen zur Genauigkeit der direkten Georeferenzierung für luftgetragene Sensorsysteme, welche ebenfalls auf der Einrichtung von Testgebieten beruhen. Allerdings werden im vorliegenden Fall vorhandene Merkmale des Straßenraums genutzt, wodurch in der Regel keine Wartung des Testfelds anfällt. Die Landmarken müssen lediglich vor einer Messfahrt auf eventuelle Änderungen überprüft werden. Dadurch entsteht ein sehr praktisches und kostengünstiges Verfahren.

Eine der ersten Untersuchungen zur Bewertung von Inertial/GNSS-Sensoren ist in SKALOUDE et al. (1996) für die Aerophotogrammetrie zu finden. Es wird vorgeschlagen, die einzelnen Standpunkte aus einer INS/GPS-Kombination mit den Ergebnissen der Aufnahmeorte aus einer Bündelblockausgleichung zu vergleichen.

Für Mobile-Mapping-Systeme mit einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung erfolgt die Bewertung zumeist durch die Analyse einer Trajektorie, welche durch ein Positionierungssystem gemessen wird. So wird in DOBROBANTU & ZEBHAUSER (1999) die Trajektorie einer Low-Cost Inertialeinheit in Abhängigkeit der Updates der präzisen differentiellen GNSS-Lösung verglichen. Diese Methode betrachtet allerdings lediglich die Auswirkungen der Genauigkeit einer Inertial/GNSS-Kombination auf die Trajektorie, jedoch nicht die Auswirkung auf die Messungen integrierter Laserscanner.

Erste Untersuchungen zur Bewertung eines gesamten Mobile-Mapping-Systems anhand von gemessenen Referenzpunkten finden sich in BARBER et al. (2008), wobei hier die in den LiDAR-Daten detektierten Merkmale größtenteils mit Hilfe einer kommerziellen Software manuell extrahiert und den Referenzdaten zugeordnet werden. In KAARTINEN et al. (2012) und KUKKO et al. (2012) werden Merkmale des Straßenraums, wie Straßenlaternen und Gebäudekanten, zur Beurteilung der Genauigkeit eines Mobile-Mapping-Systems genutzt, wobei die Auswertung teilauto-

matisiert erfolgt. Außerdem wird das gesamte Mapping-System untersucht, welches auch die verwendeten Laserscanner beinhaltet. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in KAARTINEN et al. (2012) und KUKKO et al. (2012) ist hier durch die simultane Messung der Einfluss der Laserscanner für alle Systeme derselbe, so dass eine Aussage über die Genauigkeit der Sensoren zur Bestimmung der Pose getroffen werden kann. Dies wird durch simultane Messungen der Inertial/GNSS-Kombinationen innerhalb desselben Mappings-Systems erreicht. Ein weiterer, sich von den bisherigen Forschungen unterscheidender Aspekt, ist die vollautomatisierte Auswertung der Messungen.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt. In Abschnitt 2 wird das Bewertungskonzept vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung und Verdrehung des Systems gelegt wird. In Abschnitt 3 wird beschrieben, wie dieses Konzept umgesetzt werden kann. Exemplarische Ergebnisse von Messfahrten werden in Abschnitt 4 präsentiert, Abschnitt 5 fasst schließlich die Ergebnisse zusammen.

2 Bewertungskonzept

Ziel des Bewertungskonzeptes ist es, Ergebnisse (Punktwolken, Fahrzeugpositionen) von Messfahrten eines beliebigen, kommerziellen Mobile-Mapping-Systems heranzuziehen, um möglichst einfach Aussagen über den Einfluss der verwendeten Inertial/GNSS-Kombinationen zu erhalten. Dabei ist kein Zugang zur internen Verarbeitung der einzelnen Sensoren (GNSS, IMU, Laserscanner) oder deren Fusion notwendig.

Ein entscheidendes Kriterium zur Bewertung der Inertial/GNSS-Sensoren ist die Genauigkeit des Systems. Für viele Anwendungsfälle ist hierbei vor allem die Richtigkeit (äußere Genauigkeit) der Pose relevant. Da die GNSS-Lösungen der hier bewerteten Systeme ohne Korrekturdaten bestimmt werden, liegt die zu erwartende Genauigkeit im Dezimeter- bis Meterbereich. Zur Beurteilung der Richtigkeit bedarf es einer Referenzlösung. Als Referenz dienen in unserer Arbeit Landmarken in Form von Straßenlaternen, welche vor-

ab mit einer für diese Anwendung ausreichenden Genauigkeit von $\sigma_{2D} < 5$ cm terrestrisch eingemessen wurden. Diese Landmarken werden in der Punktwolke segmentiert, welche sich aus den Messungen des Laserscanners ergibt. Anschließend wird die Abweichung zur Referenzposition untersucht. Die segmentierten Landmarken können gleichzeitig auch zur Bewertung der Wiederholgenauigkeit dienen, indem beispielsweise die Streuung der Abweichungen betrachtet wird. Sowohl für die Richtigkeit, als auch für die Wiederholgenauigkeit des Systems konzentrieren wir uns auf die Untersuchung der 2D-Genauigkeit, da für viele Anwendungen, insbesondere im Automotive-Bereich, die Höhe von geringer Bedeutung ist.

Des Weiteren sollte auch die Genauigkeit des Drehraten- und Beschleunigungssensors untersucht werden. Starke Beschleunigungen lassen sich in einem Fahrzeug durch Beschleunigungsvorgänge oder starke Bremsvorgänge erzeugen, hohe Drehraten im Gierwinkel (Heading) durch enge Kurven, beispielsweise in einem Kreisverkehr. Werden parallel zu diesen Vorgängen Landmarken von den Laserscannern erfasst, so können anschließend wiederum die Abweichungen zu den Referenzlandmarken untersucht werden. Eine Möglichkeit zur Analyse starker Veränderungen im Roll- und Nick-Winkel ist das Fahren über eine Rampe oder Wippe. Hierbei können insbesondere die Auswirkungen auf die Form einer durch die Scanner erfassten Ebene betrachtet werden.

Darüber hinaus ist das Rauschen des Systems wichtig. Neben der direkten Betrachtung des Rauschens in der Position und Ausrichtung des Fahrzeuges bietet es sich an, auch das Rauschen von Messpunkten auszuwerten, welche in einer Ebene liegen. Es ist jedoch zu beachten, dass somit auch das Messrauschen der Laserscanner und die Unebenheit des betrachteten Objektes, beispielsweise einer Hauswand, mit einbezogen werden.

Insbesondere in Stadtgebieten mit großen Abschattungen spielt auch die Drift der Inertialeinheit eine bedeutende Rolle. Ist keine GNSS-Lösung verfügbar, so wächst der Positionsfehler mitunter quadratisch mit der Zeit an. Dieses Verhalten kann untersucht werden, indem das GNSS-Signal von den Messungen der Inertialeinheit getrennt wird, so dass kei-

ne GNSS-Updates in die Berechnung der Pose einfließen.

Aus Platzgründen konzentrieren wir uns auf die Untersuchung der Genauigkeit der Positionierung und Verdrehung durch die Auswertung von Distanz- und Winkelmessungen zu Landmarken sowie der durch die Fahrt über eine Rampe hervorgerufenen Effekte.

3 Umsetzung des entwickelten Bewertungskonzeptes

Zur Bestimmung der einzelnen in Abschnitt 2 genannten Bewertungskriterien wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher Landmarken aus der mit Laserscannern aufgezeichneten Punktwolke segmentiert. Diese Position wird anschließend mit der Referenzposition verglichen, welche aus einer terrestrischen Aufnahme der Landmarken mit übergeordneter Genauigkeit bekannt ist. Um zusätzlich die Genauigkeit der Verdrehung im Roll- und Nick-Winkel zu untersuchen, werden die Auswirkungen auf eine Ebene bei auftretenden Winkelveränderungen untersucht. Diese Veränderungen werden durch eine Fahrt über eine Rampe erzeugt. Während der Fahrt mit einer Fahrzeugseite über diese Rampe wird eine zur Fahrtrichtung parallele Ebene durch die Laserscanner erfasst.

3.1 Wahl eines Referenzgebietes

Das in Abb. 1 dargestellte Referenzgebiet enthält sowohl Geradenabschnitte als auch Kurven. Zusätzlich bietet ein Kreisverkehr die Möglichkeit, Wiederholmessungen durchzuführen und die Genauigkeit des Headings zu untersuchen. Auf Grund der klaren und einfachen Zylinderform und der regelmäßigen Verteilung wurden Straßenlaternen als Landmarken gewählt. Das Gebiet hat eine Ausdehnung von etwa $500 \text{ m} \times 250 \text{ m}$. Es wurden insgesamt 31 Straßenlaternen mit einer Genauigkeit von unter 5 cm in der Lage terrestrisch eingemessen. Diese Laternen dienen in der Auswertung als Referenzlandmarken.



Abb. 1: Gewähltes Referenzgebiet (Merxurg, Hamburg) mit eingemessenen Landmarken (rot) (GOOGLE INC. 2013).

3.2 Segmentierung von Landmarken

Zur Segmentierung der Landmarken ist es zunächst notwendig, potentielle stangenförmige Landmarken in der Punktmenge zu detektieren. Es muss validiert werden, ob die so gefundenen Objekte den tatsächlichen Landmarken entsprechen, so dass anschließend die detektierten Punktmenge den Referenzlandmarken zugeordnet werden können. Um die Distanz einer segmentierten Landmarke zu ihrer Referenz zu bestimmen, muss der Mittelpunkt der Landmarke bestimmt werden. Dies geschieht in diesem Fall durch eine Zylinderschätzung.

Der Algorithmus basiert im Wesentlichen darauf, dass für verschiedene Regionen in der Punktwolke die Anzahl der Fußpunkte in der Grundrissebene bestimmt wird. Regionen mit einer hohen Punktzahl kommen als Landmarken in Frage. Ein ähnliches Konzept, jedoch nur zur Stangendetektion, findet sich auch in BRENNER (2009). Die potentiellen Landmarken werden in der Folge auf weitere Kriterien überprüft und anhand dieser der Referenzlandmarke zugeordnet. Im ersten Schritt wird die Punktwolke in der Umgebung einer bekannten Landmarke in die x/y -Ebene projiziert und mit Hilfe der freien C++-Bibliothek *Point Cloud Library* (PCL) (POINT CLOUD LIBRARY 2013) in einem Quadtree mit einer

Zellenbreite von 2 cm gespeichert. Anschließend wird für jedes Blatt, das heißt für jeden Knoten in der untersten Ebene des Quadtrees, die Anzahl der in die x/y -Ebene projizierten Punkte innerhalb eines vorgegebenen Radius r bestimmt. Als Radius erwies sich der doppelte gemessene Radius der jeweiligen Referenzlandmarke als geeignet. Der Radius der Referenzlandmarken betrug in unserem Fall stets 7,4 cm. Blätter mit einer Mindestanzahl von Punkten (20) innerhalb dieses doppelten Radius liefern Kandidaten für Landmarken. Da sich auf diese Weise wegen der relativ kleinen Zellbreite für jede Landmarke mehrere eng benachbarte und sich in Hinblick auf die involvierten Punkte überlappenden Kandidaten ergeben, wird eine Unterdrückung von Nicht-Maxima durchgeführt. Für die Hypothese mit den lokal meisten enthaltenden Punkten wird die entsprechende Punktwolke als potentielle Landmarke gespeichert. Im nächsten Schritt wird überprüft, welche detektierte Stange der Referenzlandmarke zugeordnet werden kann. Diese Überprüfung findet anhand der Distanz statt, wobei die potentielle Landmarke mit der geringsten Distanz der Referenzlandmarke zugeordnet wird. Konnte einer Landmarke eine segmentierte Stange zugeordnet werden, so wird versucht, mit Hilfe von RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981) aus den enthaltenden Punkten die Parameter eines bestange-

passten Zylinders zu schätzen. Hierbei ist zu beachten, dass an die Stange angebrachte Objekte (beispielsweise Straßenschilder) dazu führen können, dass kein Zylinder bestimmt werden kann. In diesem Fall wird die entsprechende Landmarke aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Die Mittelachse kann auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden, so dass bei den erwarteten Messgenauigkeiten der Einfluss der Zylinderschätzung auf die Sensorbeurteilung gering ist.

Abb. 2 zeigt eine so durchgeführte Extraktion der Landmarken, wobei die Distanz zur Referenz hier nur für Stangen eingezeichnet ist, deren Zylinderparameter erfolgreich geschätzt werden konnten. Zu den rot eingefärbten Referenzpositionen werden die jeweiligen Landmarken in der Punktwolke gefunden und zugeordnet. Um sicherzustellen, dass es sich um eine freistehende, stangenförmige Landmarke handelt, wird für jedes gefundene Objekt überprüft, wie viele Punkte sich in einem um 50 cm erweiterten Radius in der Umgebung des Objektes befinden. Überschreitet die Anzahl der Punkte, die zusätzlich in dem erweiterten Radius auftreten, einen Grenzwert von zehn Prozent der im Suchradius enthaltenen Punkte, so wird das Objekt als mögliche Landmarke verworfen. Weiter treten bei Bäumen oder Büschen große Punktabstände zwischen vertikal benachbarten Punkten auf, so dass sich hier über eine maximale Höhendifferenz zwischen solchen Punkten ein weiteres Filterkriterium definieren lässt. In unserer Arbeit wurde dieser Grenzwert zu einem Meter bestimmt.

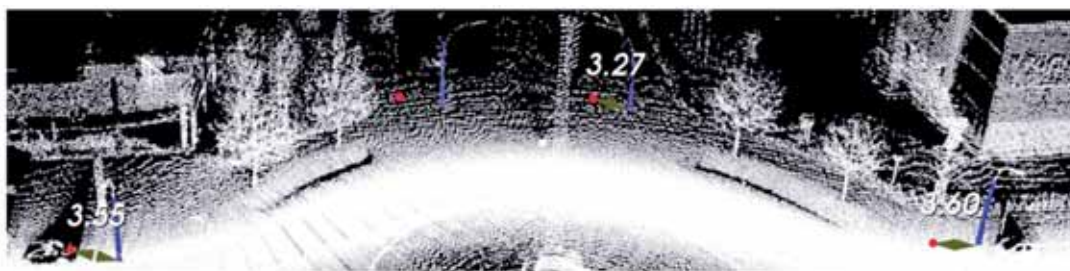


Abb. 2: Punktwolke mit segmentierten Landmarken (blau), deren Referenzpositionen (rot) sowie der jeweiligen Distanz.

3.3 Bestimmung der Bewertungskriterien

Zur Beurteilung eines Inertial/GNSS-Sensors müssen hinsichtlich dessen Genauigkeit wie im Folgenden beschrieben die Werte der jeweiligen Kenngrößen bestimmt werden. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Bestimmung der Richtigkeit und der Wiederholgenauigkeit der Pose sowie einer hiervon getrennten Untersuchung der Genauigkeit der Verdrehung.

Richtigkeit der Pose

Um die Richtigkeit der Bestimmung der Pose zu untersuchen, werden die segmentierten Landmarken mit deren Referenzen bezüglich der Position verglichen. Hierbei werden die Differenzen der x - und y -Koordinaten sowie die euklidische 2D-Distanz zu den geschätzten Zylindermittelpunkten der segmentierten Landmarken betrachtet. Anschließend wird aus den einzelnen Abweichungen der quadratische Mittelwert (RMS) berechnet. Über eine Visualisierung kann der Anwender zusätzlich Landmarken mit weiterhin fehlerhaften Zuordnungen oder sonstigen Fehlern detektieren, so dass diese Landmarken anschließend manuell aus der Berechnung des RMS entfernt werden können.

Wiederholgenauigkeit der Pose

Zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit können die Abweichungen zwischen segmentierten Stangen betrachtet werden, die denselben Referenzen zugeordnet wurden. Auch hier werden die Standardabweichungen der Abweichungen vom Mittelwert berechnet.

Genauigkeit der Verdrehung

Die Genauigkeit der Verdrehung wird in diesem Fall durch eine Analyse der Auswirkungen hoher Werte (mehrere Grad) und starker Veränderungen (mehrere Grad pro Sekunde) im Roll- und Nick-Winkel untersucht. Hierzu wird mit dem Fahrzeug parallel zu einer Gebäudewand gefahren, wobei zwischenzeitlich eine etwa fünf Meter lange und etwa 20 cm hohe Rampe befahren wird. Während der gesamten Fahrt nehmen die Laserscanner die Gebäudewand auf. Überschreiten die gemessenen Drehraten durch die Fahrt über die Rampe kurzzeitig einen Schwellwert, so wird die Ebene an dieser Stelle aufgeteilt. Ein weiterer Schnitt der Ebene ergibt sich, wenn die jeweiligen Schwellwerte wiederum durch das Verlassen der Rampe überschritten werden. Zur Segmentierung der Ebene aus der Punktwolke wird ein Region-Growing-Algorithmus verwendet. Abb. 3 zeigt die Aufteilung der Ebene. Die relativ großen Drehraten von mehreren Grad pro Sekunde treten hierbei während der Aufnahme des Abschnitts 2 auf. Sie resultieren aus der Auffahrt auf die und der Abfahrt von der Rampe. Der folgende konstante Höhenunterschied zwischen der linken und rechten Fahrzeugseite bewirkt große Roll-Winkel. Die Teilebenen 1 und 3 bezeichnen die Ebenen, in denen das Fahrzeug sich nicht auf der Rampe befindet und weder große Winkel noch hohe Drehraten auftreten. Im folgenden Schritt werden aus den Punktmengen der einzelnen Teilebenen Ebenenparameter geschätzt und die Standardabweichung der Abweichungen der jeweiligen Punktmenge von dieser Ebene bestimmt. Diese Standardabweichung

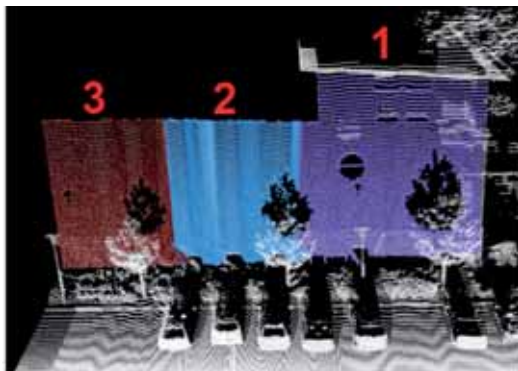


Abb. 3: Teilebenen der aufgenommenen Ebene.

wird als Indikator zur Beurteilung der Genauigkeit der Verdrehung genutzt. Anschließend wird geprüft, ob die Abweichung der Ebene zur Teilebene höher als für die Gesamtebene ist. Ist dies der Fall, so lässt die höhere Standardabweichung auf einen verbleibenden Einfluss der hohen Drehraten schließen, welcher in diesem Fall in einem höheren Rauschen in der Positionsbestimmung resultiert.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Beschaffenheit der Ebene sowie die Genauigkeit der Laserscanner-Messungen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Da dieser Einfluss bei einer simultanen Aufnahme für alle Inertial/GNSS-Sensoren konstant ist, wurde er für diesen Beitrag vernachlässigt.

4 Empirische Genauigkeitsuntersuchungen

Das entwickelte Konzept wurde zur Bewertung der Genauigkeit dreier Inertial/GNSS-Kombinationen mit teils unterschiedlichen Genauigkeitsklassen verwendet: Ein Sensor der Firma Oxford Technical Solutions (OXTS) mit einem Preis von etwa 30.000 Euro, ein weitaus günstigerer MEMS-Sensor der Marke Xsens für etwa 4.000 Euro sowie ein Prototyp der Firma Northrop Grumman LITEF, dessen Spezifikationen nicht veröffentlicht sind und zu dessen Preis noch keine Angaben gemacht werden können. Alle Systeme verfügten hierbei über eine eigene GNSS-Antenne. Weitere Sensordaten sind in Tab. 1 zu finden.



Abb. 4: Schematische Messkonfiguration.

Tab. 1: Spezifikationen der Sensoren OXTS RT 3040 (OXFORD TECHNICAL SOLUTIONS LTD 2013) und Xsens MTi-G (XSENS TECHNOLOGIES B.V. 2013).

	Inertial/GNSS-System	OXTS RT 3040	Xsens MTi-G
GNSS	Positionsgenauigkeit (CEP)	1,5 m	2,5 m
	Updaterate GNSS	Keine Angabe	4 Hz
	Receiver-Typ	L1/L2 (GPS)	L1 (GPS)
Beschleunigungssensor	Bias-Stabilität (1σ)	10 mm/s ²	20 mm/s ²
	Bias-Linearität	0,01%	0,2%
Drehratensensor	Bias-Stabilität (1σ)	2°/h	20°/h
	Bias-Linearität	Keine Angabe	0,1%
Winkelgenauigkeit	Roll/Pitch (1σ)	0,03°	0,5°
	Yaw (1σ)	0,1°	1°
Sonstiges	Gewicht	2200 g	68 g
	Preis	~30.000 EUR	3.790 EUR

Die Sensoren sind in einem mit drei SICK-LMS511-Zeilenlaserscannern ausgestatteten herkömmlichen PKW verbaut (Abb. 4). Dieses Mobile-Mapping-System wurde von der SICK AG entwickelt und für die Messungen bereitgestellt. Die Messungen wurden simultan durchgeführt.

Der zufällige Fehler der Distanzmessung der Scanner beträgt bei einer Reichweite von 10–20 Metern 35 Millimeter und wurde durch entsprechende Kalibrierparameter berücksichtigt. Der statistische Fehler bei derselben Reichweite beträgt acht Millimeter, die Winkelauflösung 1°. Da die Landmarken größtenteils von den vertikal ausgerichteten, seitlich angebrachten Laserscannern aufgenommen wurden und die Entfernung der Landmarken zu den Laserscannern in der Regel weniger als zehn Meter betrug, ist der Beitrag der Unsicherheit der Laserscanner für die Messungen der Landmarken vernachlässigbar. Auf den Vergleich der Standardabweichungen der Ebenen zur Beurteilung der Genauigkeit der Verdrehung wirkt lediglich der zufällige Fehler von acht Millimetern. Aufgrund der kompakten Abmessungen und der präzisen Fertigung sind wir von einer hinreichenden Genauigkeit und Stabilität der relativen Lage der Komponenten zueinander ausgegangen. Seitens der SICK AG wurde vorab die relative Lage eingemessen und anschließend aus dieser Einmessung die Parameter der Boresight-

Kalibrierung für das verwendete Messsystem bestimmt. Auf eine Verbesserung dieser Parameter aus Pass- und Verknüpfungspunkten wurde verzichtet. Weiterhin befanden sich die Landmarken stets in einer ähnlichen Entfernung zum Fahrzeug, wodurch distanzabhängige Fehlereinflüsse nicht erwartet werden.

Zur Beurteilung der Sensoren wurden Fahrten bei unterschiedlicher Geschwindigkeit (15 km/h, 30 km/h) und in unterschiedlicher Richtung im Messgebiet durchgeführt, wobei stets alle drei Sensorsysteme mitgeführt wurden. Für die unterschiedlichen Fahrten waren keine Veränderungen in den Ergebnissen zu erkennen.

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich auf Fahrten bei 30 km/h. Die Messungen der Laserscanner erfolgten mit einer Frequenz von 100 Hz. Insgesamt konnten für drei Umfahrten zwischen 82 und 92 Landmarken (abhängig vom Inertial/GNSS-System) aus den Punktwolken automatisch segmentiert und Referenzlandmarken zugeordnet werden. Über die Visualisierung wurden hierbei keine Fehldetektionen festgestellt. Die horizontalen Abweichungen der Stangen werden für die jeweiligen Sensoren in Abb. 5 dargestellt.

Des Weiteren wurden zur Untersuchung der Genauigkeit der Verdrehung drei Fahrten über eine Rampe mit jeweils gleicher Geschwindigkeit durchgeführt.

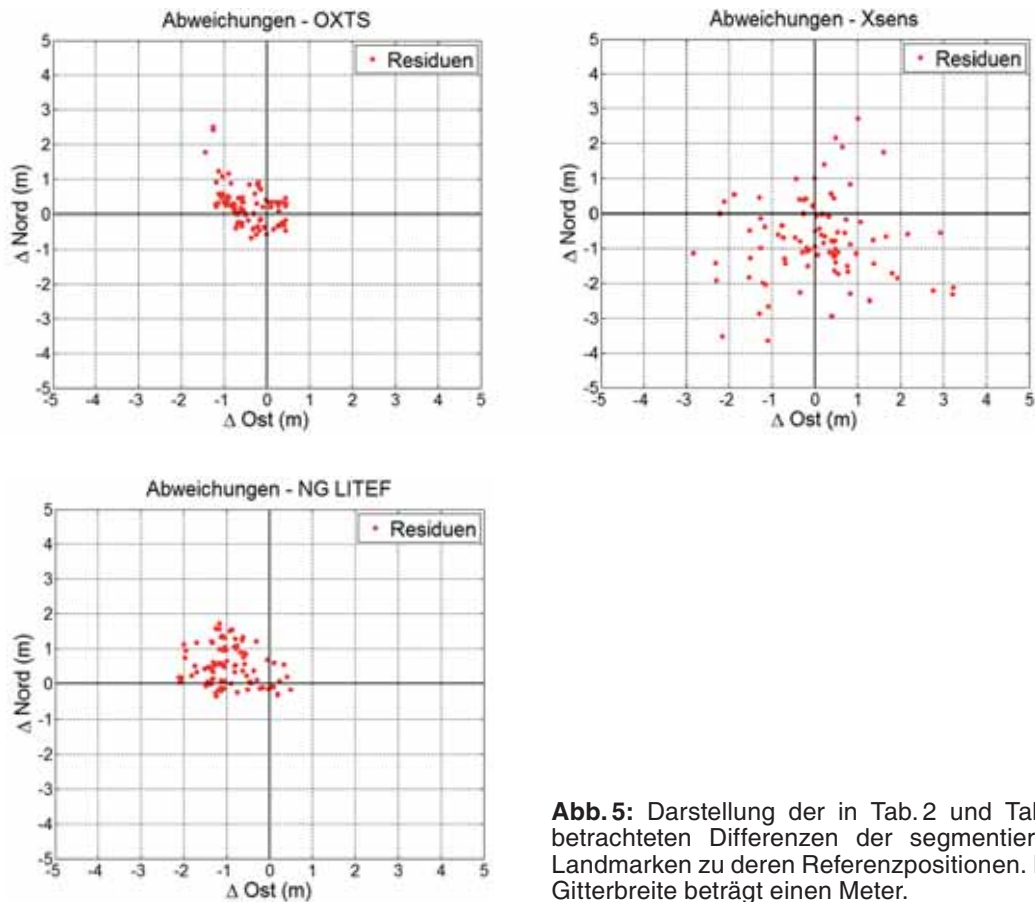


Abb. 5: Darstellung der in Tab.2 und Tab.3 betrachteten Differenzen der segmentierten Landmarken zu deren Referenzpositionen. Die Gitterbreite beträgt einen Meter.

Tab. 2: RMS und Bias der Differenzen der segmentierten Landmarken zu deren Referenzpositionen. Die niedrigsten Abweichungen sind hervorgehoben.

	OXTS	Xsens	NG LITEF	NG LITEF PP
RMS 2D (m)	0,90	1,84	1,34	1,33
RMS Nord (m)	0,61	1,40	0,74	0,74
RMS Ost (m)	0,66	1,20	1,12	1,11
Bias 2D (m)	0,59	0,66	1,04	1,03
Bias Nord (m)	0,17	-0,62	0,48	0,48
Bias Ost (m)	-0,56	0,23	-0,92	-0,91

4.1 Beurteilung der Richtigkeit

Die sich aus den Messungen ergebenden RMS-Werte der Zylindermittelpunkte sind in Tab. 2 aufgelistet und die einzelnen Abweichungen in Abb. 5 aufgezeigt. Hierbei beschreibt *PP* die vom NG-LITEF-Framework zur Verfügung gestellte Postprocessing-Lösung der mit dem

NG-LITEF-Empfänger gemessenen Trajektorie, welche lediglich eine Glättung der Trajektorie bewirkt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Lösungen des NG-LITEF- sowie des OXTS-Sensors systematisch verschoben sind. Gründe hierfür könnten eine ungenaue Zeitsynchronisierung oder auch bisher nicht detektierte Systematiken von Fehlern in den

Parametern der Boresight-Kalibrierung sein. Es ist weiter ersichtlich, dass die Abweichungen des OXTS-Sensors am geringsten sind. Hier beträgt der RMS-Wert zur Referenzposition einer Landmarke in der Lage 0,90 m. Die Abweichungen der Xsens- und LITEF-Lösungen sind mit 1,84 m bzw. 1,34 m deutlich höher.

4.2 Beurteilung der Wiederholgenauigkeit

Zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit des Systems sind verschiedene Ansätze möglich. An dieser Stelle wurden die Streuung der Abweichungen aus Abb. 5 bezogen auf die Mittelwerte untersucht. Weitere Möglichkeiten sind die Untersuchung der Abweichungen zwischen denselben segmentierten Landmarken bei Wiederholungsmessungen sowie die der Veränderungen der Abweichungen in aufeinanderfolgenden Landmarken.

Betrachtet man die Streuung zwischen den gemessenen und den Referenzpositionen der Landmarken bezogen auf die mittleren Abweichungen, so ist ersichtlich, dass jene des Xsens-Sensors in etwa um den Faktor zwei höher als die der übrigen Lösungen sind (siehe

Tab. 3). Somit ist dessen Wiederholgenauigkeit als deutlich schlechter einzustufen.

4.3 Beurteilung der Genauigkeit der Verdrehung

Bei einer Anfälligkeit der Sensoren gegenüber hohen Drehraten oder Orientierungswinkeln wären Abweichungen der einzelnen Ebenen aus Abschnitt 3.3 von der Gesamtebene zu erwarten. Um dies zu überprüfen, werden sowohl für die drei Ebenenabschnitte separat als auch für die Gesamtebene ausgleichende Ebenen bestimmt. Weiterhin wird die mittlere quadratische Abweichung (RMS) der Punkte zur zuvor bestimmten Ebene berechnet. Dieser Vorgang wurde dreimal durchgeführt und anschließend das geometrische Mittel der RMS-Werte bestimmt.

In einer Voruntersuchung wurden die Standardabweichungen der RMS-Abweichungen der Gesamtebene bestimmt. Hierzu wurden insgesamt zwölf Aufnahmen der Gesamtebene pro Sensor gemacht, wobei die Rampe entfernt war, so dass es zu keinen größeren Verdrehungen kam. Aus diesen Aufnahmen wurden die Ebenenparameter und hieraus die mittleren quadratischen Abweichungen der

Tab. 3: Standardabweichungen der Differenzen zu den Referenzlandmarken bezogen auf die mittlere Abweichung. Die niedrigsten Abweichungen sind hervorgehoben.

1σ (m)	OXTS	Xsens	NG LITEF	NG LITEF PP
2D	0,75	1,67	0,62	0,62
Nord	0,56	1,16	0,53	0,53
Ost	0,50	1,20	0,60	0,60

Tab. 4: RMS-Werte sowie die Standardabweichungen der RMS-Werte der Ebenen. Die hohen Drehraten und Orientierungswinkel treten während der Aufnahme der Teilebene 2 auf.

		OXTS	Xsens	NG LITEF	NG LITEF PP
Standardabweichung der RMS-Bestimmung (m)		0,018	0,021	0,020	0,020
RMS zu den Teilebenen	1 (1 σ) (m)	0,046	0,043	0,041	0,039
	2 (1 σ) (m)	0,021	0,032	0,018	0,015
	3 (1 σ) (m)	0,017	0,046	0,020	0,016
RMS zur Gesamtebene	(1 σ) (m)	0,033	0,040	0,037	0,035

Gesamtebene und deren Standardabweichungen zum geometrischen Mittel für alle Sensoren bestimmt.

Zur Analyse des Einflusses der Verdrehung wird der RMS-Wert des untersuchten Ebenenabschnitts mit dem Wert der Gesamtebene verglichen. Wie in Tab.4 dargestellt, ist die Differenz zwischen den RMS-Werten der einzelnen Ebenenabschnitte und dem Wert der gesamten Ebene stets niedriger als die aus mehreren Messungen bestimmte Standardabweichung der RMS-Werte der Gesamtebene. Demzufolge ist hier kein deutlicher durch das Fahren über eine Rampe hervorgerufener Effekt erkennbar. Es ist allerdings anzumerken, dass sich auch die Beschaffenheit der Gebäudewandabschnitte auf die Ergebnisse auswirkt. Dennoch kann hier kein Einfluss der Drehraten und hohen Orientierungswinkel auf die Messgenauigkeit des Gesamtsystems festgestellt werden.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Konzept vorgestellt, um die Genauigkeit von Inertial/GNSS-Modulen in mit Laserscannern ausgestatteten Mobile-Mapping-Systemen zu bewerten. Hierzu wurden insbesondere die Richtigkeit und die Wiederholgenauigkeit der Pose sowie die Genauigkeit der Verdrehung als wesentliche Bewertungskriterien festgelegt. Es wurden Methoden entwickelt, um aus den Messungen der Laserscanner die entsprechenden Kenngrößen automatisch zu bestimmen. In diesem Zusammenhang wurden in einem Referenzgebiet Landmarken mit übergeordneter Genauigkeit eingemessen. Durch einen entsprechenden Algorithmus ließen sich diese Landmarken in Form von Straßenlaternen aus den in Messfahrten aufgezeichneten Punktwolken segmentieren und die Position der segmentierten Objekte mit den Referenzen vergleichen. Kern dieses Algorithmus ist die Projektion der Punktwolke auf die x/y -Ebene. Zur Segmentierung einer Landmarke werden Gebiete mit einer hohen Punktdichte gewählt und die zugehörigen dreidimensionalen Punkte extrahiert. Mit diesem Algorithmus erfolgt eine automatische Segmentierung und Zuordnung der Landmarken aus einer aufgenom-

menen Punktwolke. Aus den Abweichungen der segmentierten Landmarken zu deren Referenzen lässt sich auf die äußere Genauigkeit (Richtigkeit) des verwendeten Inertial/GNSS-Sensors, aus der Streuung der Abweichungen auf die Wiederholgenauigkeit (Präzision) schließen. Die Genauigkeit der Verdrehung wurde durch eine Fahrt über eine Rampe mit anschließender Analyse der parallel von den Laserscannern aufgenommenen Ebene untersucht.

Das entwickelte Konzept wurde auf drei verschiedene Systeme angewendet. Hierbei zeigte sich, dass die Kenngrößen zur Bewertung der Genauigkeit bestimmt werden konnten. Insgesamt ergaben sich für die Sensoren der Firma OXTS und NG LITEF vergleichbare Ergebnisse, für den deutlich preiswerteren XSens-Sensor wie erwartet geringere Genauigkeiten.

Die Stärke des vorgestellten Bewertungskonzeptes liegt in der Automatisierbarkeit und der hieraus resultierenden geringen Auswertzeit für den Anwender. Ist ein Referenzgebiet verfügbar, so können die Bewertungskriterien ohne größeren Aufwand bestimmt werden.

Zur Untersuchung hochgenauer Inertial/GNSS-Systeme sind jedoch die Genauigkeiten der Laserscanner und der Referenzlandmarken sowie die Unebenheiten der verwendeten Häuserfassaden die limitierenden Faktoren. Weiter müssen hier auch die Laserscanner gegenüber der Inertial/GNSS-Einheit mit hoher Genauigkeit kalibriert sein. Hier könnte das Verfahren in Zukunft durch eine Bore-sight-Kalibrierung ergänzt werden. Auch gilt es, für eine gesamte Bewertung eines Sensors weitere Bewertungskriterien zu definieren.

Anmerkung

Die Autoren zielen in diesem Beitrag nicht auf eine Instrumentenempfehlung ab. Die Firmen- und Produktnamen sind nur zur Transparenz angegeben. Der Leser soll sich ermutigt fühlen, sein eigenes Equipment unter Nutzung des vorgeschlagenen Testkonzepts und unter Berücksichtigung seiner spezifischen Anwendung zu testen.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei der SICK AG, insbesondere bei Dr.-Ing. KAY FUERSTENBERG, Dr.-Ing. ROLAND KRZIKALLA sowie Dipl.-Ing. MARC SOWEN für die Durchführung der Messungen und die Unterstützung während der Auswertung der Ergebnisse bedanken.

Literaturverzeichnis

- BARBER, D., MILLS, J. & SMITH-VOYSEY, S., 2008: Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. – ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing 2008 **63**: 128–141.
- BRENNER, C., 2009: Extraction of features from mobile laser scanning data for future driver assistance systems. – Advances in GIScience: 12th AGILE Conference on GIScience, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography: 25–42, Springer, Berlin, Heidelberg.
- DOROBANTU, R. & ZEBHAUSER, B.R., 1999: Field Evaluation of a Low-Cost Strapdown IMU by means GPS. – Ortung und Navigation **1999** (1): 51–65.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – Communications of the ACM **24** (6): 381–395.
- GOOGLE INC., 2013: Google Earth (V. 7.1.1.1888). GeoBasis-DE/BKG (2009). Merckuring, Hamburg. Bildaufnahmedatum: 6.10.2006. <http://www.google.de/intl/de/earth/index.html> (30.4.2013).
- KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., KUKKO, A., JAAKKOLA, A. & HYYPPÄ, H., 2012: Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. – Sensors 2012 **12**: 12814–12835.
- KUKKO, A., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J. & CHEN, Y., 2012: Multiplatform Mobile laser scanning: Usability and performance. – Sensors 2012 **12**: 11712–11733.
- OXFORD TECHNICAL SOLUTIONS LTD, 2013: RT3000: Hochpräzise GPS-gestützte Inertialmesssysteme (Datenblatt). http://www.oxts.com/Downloads/Products/RT3000/RT3000_DE.pdf (30.4.2013).
- POINT CLOUD LIBRARY, 2013. www.pointclouds.org (30.4.2013).
- SKALLOUD, J., CRAMER, M. & SCHWARZ, K., 1996: Exterior orientation without ground control. – ISPRS Congress Commission III, ISPRS Archives **31** (B3): 125–130.
- XSENS TECHNOLOGIES B.V., 2013: MTi-G. Miniature AHRS with intergrated GPS (Datenblatt). http://www.xsens.com/images/stories/products/PDF_Brochures/mti-g%20leaflet.pdf (30.4.2013).

Adresse der Autoren:

ALEXANDER SCHLICHTING & apl. Prof. Dr.-Ing. CLAUD BRENNER, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9A, 30167 Hannover, Tel.: +49-511-762-3465, Fax.: +49-511-762-2780, e-mail: {alexander.schlichting}{claus.brenner}@ikg.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. STEFFEN SCHÖN, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover, Schneiderberg 50, 30167 Hannover, Tel.: +49-511-762-3397, Fax.: +49-511-762-4006, e-mail: schoen@ife.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: Mai 2013

Angenommen: September 2013



Abbildende und nichtabbildende Geländespektrometrie zur Untersuchung von Stressphänomenen an Buchenpflanzen

OXSANA STERN, BARBARA PASCHMIONKA, JOHANNES STOFFELS, HENNING BUDDENBAUM & JOACHIM HILL, Trier

Keywords: abbildende Spektrometrie, Trockenstress, Vegetationsindizes

Zusammenfassung: Im Zuge des prognostizierten Klimawandels wird sich der Einfluss von Hitze und Trockenheit auf Waldökosysteme verschärfen. Somit nimmt die Bedeutung quantitativer Monitoringmethoden in Bezug auf biochemische und biophysikalische Parameter in der Vegetationsanalyse zu. Dies setzt höhere spektrale und räumliche Auflösungen von Sensoren voraus. Diese Arbeit soll das Potenzial von spektral hochauflösenden, abbildenden und nichtabbildenden Sensoren zur Erfassung von Vegetationsparametern während eines induzierten Trockenstresses untersuchen. Hierzu wurde in den Jahren 2011 und 2012 ein Austrocknungsexperiment an Buchen (*Fagus sylvatica* L.) durchgeführt. Aus der Auswertung von Bilddaten und der spektralen Reflexionssignale sowie der daraus abgeleiteten Vegetationsindizes werden Aussagen über den pflanzenphysiologischen Zustand getroffen. Die detaillierte Analyse befasst sich vor allem mit den ausgewählten Vegetationsindizes und deren Eignung für die Trockenstressanalyse sowie deren Sensitivität gegenüber Änderungen von Blattwasser- und Chlorophyllgehalten.

Summary: *The use of imaging and non-imaging Spectroscopy for the determination of stress phenomena of beech trees.* Regarding the predicted climate change, extreme weather events, like heat waves and drought episodes, will be more frequent and thus their impact on forest ecosystems is expected to be stronger. In this context, sustainable forest management and monitoring strategies have to be adapted for saving the multifunctional role of forests. The retrieval of biophysical and biological parameters from remote sensing hyperspectral imagery is a substantial issue for the accurate assessment of forest decline. In this study, we tested the potential of high resolution imaging and non-imaging spectroscopy data for detecting biochemical vegetation parameters during an induced drought stress. For this we implemented a controlled drying-experiment on the European Beech (*Fagus sylvatica* L.) during two field campaigns in 2011 and 2012. The assessment of image data, spectral signatures and the derived vegetation indices give conclusions about the plant physiological conditions. The analysis includes the abilities of the chosen vegetation indices concerning drought analysis and their sensitivity towards changes in chlorophyll and water contents.

1 Einführung

Die Klimaveränderung stellt Risiken für die Wälder und deren nachhaltige multifunktionale Nutzung dar (BOLTE et al. 2009). Das häufigere Auftreten von schweren Hitze- und Dürreperioden als Folge des Klimawandels kann Artenzusammensetzungen und Struktur der Wälder in vielen Regionen verändern (ALLEN et al. 2010). Fernerkundlich erhobe-

ne Daten sind in der Lage, in diesem Kontext eine umfassende Informationsgrundlage zu liefern.

Bei Laboruntersuchungen zur Stresstoleranz und Veränderung der Reflexion aufgrund sinkenden Wassergehalts, welche auf Blattebene durchgeführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass solche Studien keinen naturgemäßen Bedingungen unterliegen. Außerdem fehlt der Direktbezug zu Beobach-

Tab. 1: Rahmenbedingungen des Experimentaufbaus in den Versuchsjahren. Hervorgehoben sind die Neuerungen der zusätzlich verwendeten Messgeräte gegenüber dem Vorjahr (KG = Kontrollgruppe, TSG = Trockenstressgruppe).

2011		2012		2013	
Setting					
Aug./Sept.	6 Wochen	August	3 Wochen	Geplant: Juli / August	
KG	9 Töpfe (22 Pflanzen)	KG	10 Töpfe (29 Pflanzen)	KG	tba
TSG	8 Töpfe (24 Pflanzen)	TSG	10 Töpfe (28 Pflanzen)	TSG	tba
Auswertung auf Topfebene		Auswertung auf Bauebene			
Messungen					
<ul style="list-style-type: none"> • Referenzmessungen <ul style="list-style-type: none"> • Bodenfeuchte • Blattwassergehalt • Chlorophyllgehalt • Nichtabbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • ASD FieldSpec II • Abbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • HySpex VNIR-1600 		<ul style="list-style-type: none"> • Referenzmessungen <ul style="list-style-type: none"> • Bodenfeuchte • Blattwassergehalt • Chlorophyllgehalt • Nichtabbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • ASD FieldSpec II • Abbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • HySpex VNIR-1600 • HySpex SWIR-320m-e 		<ul style="list-style-type: none"> • Referenzmessungen <ul style="list-style-type: none"> • Bodenfeuchte • Blattwassergehalt • Chlorophyllgehalt • Nichtabbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • ASD FieldSpec II • Abbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • HySpex VNIR-1600 • HySpex SWIR-320m-e • Hyperthermalmessungen <ul style="list-style-type: none"> • TELOPS HyperCam 	

tungen von Satellitensystemen. Durch gezielte Freilandbeobachtungen und -experimente unter kontrollierten Extrembedingungen lassen sich vorhandene Erfahrungen zusammenfassen und neue Erkenntnisse gewinnen, welche somit auf räumlich größere Skalen übertragen werden können.

Im Rahmen eines mehrjährigen (2011 bis 2013) Forschungsprojekts der Universität Trier wurde das Potenzial von spektral hochauflösenden, abbildenden optischen Sensoren zur Erfassung von biochemischen Vegetationsparametern während eines induzierten Trockenstresses an Buchenjungpflanzen untersucht.

Nach aktuellem Stand der Forschung führt der Wassermangel einerseits zur Dehydratisierung der Zelle, was sich schädigend für Enzyme und Funktionsstrukturen wie z. B. Membranen auswirkt. Weiterhin behindert der durch Wassermangel bewirkte Stomataverschluss die CO₂-Zufuhr, welche für den Prozess der Photosynthese essenziell ist (SITTE et al. 2002). Die resultierende Veränderung

der internen Blattstruktur sowie die Abnahme des Chlorophyllgehalts, welcher mit der photosynthetischen Aktivität der Pflanzen in Beziehung steht, sollten während der Experimentreihe mittels des nichtabbildenden ASD FieldSpec-Spektrometers auf Blattebene sowie der Hyperspektralkamera HySpex auf Individuenebene aufgezeigt werden.

Tab. 1 gibt einen Überblick über die Rahmenbedingungen der Experimente aus 2011 und 2012. Im Sommer 2013 soll das Trockenstressexperiment wiederholt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Austrocknungsexperiments aus 2011 vorgestellt.

2 Material und Methoden

Im Jahr 2011 vom 23. August bis zum 27. September wurde ein sechswöchiges Austrocknungsexperiment an vierjährigen Buchenpflanzen (*Fagus sylvatica* L.), einer der wirtschaftlich bedeutendsten Baumarten Deutsch-

lands, durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die Testpflanzen demselben Herkunftsgebiet entnommen.

Alle Untersuchungen wurden an den Pflanzen der Trockenstressgruppe (TSG) und der bewässerten Kontrollgruppe (KG) vorgenommen. Die KG setzte sich aus 9 Töpfen mit insgesamt 22 Buchenpflanzen und die TSG aus 8 Töpfen mit 24 Bäumen zusammen.

Um eine unmittelbare Beeinflussung durch direkte Sonneneinstrahlung, Regen und Wind zu vermeiden, wurden die Pflanzen unter einem halbdurchsichtigen Kunststoffdach untergestellt (Abb. 1).

In einem wöchentlichen Rhythmus fanden Blattwassergehaltmessungen und Chlorophyllmessungen mit dem Minolta Chlorophyll Meter „SPAD-502“, welcher den relativen Chlorophyllgehalt durch die Lichtabsorption des Blattes an 650 nm und 940 nm bestimmt, statt (MARKWELL et al. 1995). Das Messgerät berechnet daraus einen dimensionslosen Wert, den SPAD-Wert. Des Weiteren wurden Aufnahmen der Spektralsignaturen mit Hilfe des Labor- und Geländespektrometers ASD FieldSpec auf der Blattebene durchgeführt, sowie die Aufnahme der beiden Baumgruppen mit dem bildgebenden Spektrometer HySpex VNIR-1600, welches im Labor, für Geländemessungen oder auch flugzeuggestützt eingesetzt werden kann. Außerdem wurden biometrische Kennwerte (Knospenanzahl und Baumhöhe) zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Reaktionen der Töpfe erhoben.



Abb. 1: Standort und Aufbau des Trockenstressversuchs.

2.1 Radiometrische Messungen

Spektrometermessung (ASD FieldSpec II)

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Messungen der spektralen Reflexion wurden mit dem FieldSpec II der Firma Analytical Spectral Devices Inc., welches einen Wellenlängenbereich von 350 nm bis 2500 nm abdeckt, durchgeführt. Im UV/VNIR Bereich von 350 nm bis 1000 nm wird ein Silizium-Detektor verwendet. Der Detektor setzt sich aus 512 Photodioden zusammen, die so angebracht sind, dass sie das Licht innerhalb einer 1,4 nm schmalen Bande empfangen. Die spektrale Auflösung beträgt 3 nm. Im SWIR1 und SWIR2 (1000 nm bis 1800 nm und 1800 nm bis 2500 nm) werden zwei thermoelektrisch gekühlte Indium-Gallium-Arsenid-Detektoren verwendet, welche über eine spektrale Auflösung von 10 nm verfügen. Für die Messung der Blattspektren wurde der ASD Leafclip eingesetzt. Der Leafclip bietet eine nicht destruktive Möglichkeit zur Aufzeichnung der Reflexion und Transmission eines einzelnen Blattes.

Bildgebende Spektrometrie (HySpex VNIR-1600)

Die HySpex VNIR-1600 der Firma Norsk Elektro Optikk ist eine Hyperspektralkamera, welche, ausgestattet mit 160 Kanälen, einen spektralen Bereich zwischen 410 nm und 990 nm abdeckt. Die spektrale Auflösung der Kanäle beträgt 3,7 nm. Mit einem Sichtfeld von 17 Grad quer zum Aufnahmestreifen (FOV across track) detektiert die Kamera eine Zeile von 1600 Pixeln.

Die Aufnahmen mit der Hyperspektralkamera erfolgten auf dem Gewächshausgelände der Universität Trier. Der Sensor wurde auf einem Gestell in 3,8 m Höhe über Grund montiert (Abb. 2). Neben den drei parallel angeordneten Töpfen wurde ein rechteckiges Referenzpanel aus Spectralon® im Aufnahmebereich platziert. Die Datenvorprozessierung beinhaltet zuerst eine radiometrische Kalibrierung der Daten. Die Daten werden in Strahldichtewerte (at-sensor-radiance, $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$) umgerechnet. Dabei werden auch



Abb. 2: Versuchsaufbau für die Hyperspektralaufnahmen. Die Bewegungsrichtung des Sensors ist mit dem Pfeil angedeutet.

Streifen im Bild eliminiert, die durch unterschiedliche Empfindlichkeiten der einzelnen Sensorelemente zustande kommen. Anschließend erfolgt eine räumliche Aggregation, bei der vier Pixel zu einem zusammengefasst werden. Durch Division der Strahldichtewerte durch das mittlere Spektrum des Referenzpanels wird schließlich die relative Reflexion berechnet.

2.2 Vegetationsindizes

Zahlreiche Autoren (u.a. PEÑUELAS et al. 1995, ROBERTS et al. 2012) haben sich in den letzten Jahren bereits mit der Entwicklung von Indizes, die darauf hinzielen, eine hohe Korrelation mit relevanten Vegetationsparametern wie Blattfläche, Gesamtbiomasse, Pflanzenzustand, Pigment- und Wassergehalt herzustellen, beschäftigt. Für diese Arbeit wurden zwölf Indizes ausgewählt, die sich in zahlreichen Studien bezüglich ihrer Eignung zur Ableitung von biochemischen und biophysikalischen Vegetationsparametern bewährt haben

Tab. 2: Übersicht über die Vegetationsindizes. Mit (*) sind Indizes markiert, die nur für hyperspektrale Sensoren geeignet sind. ρ gibt den Reflexionsgrad bei der jeweiligen Wellenlänge an.

Vegetationsindex	Indexgleichung	Referenz
Simple Ratio	$SR = \rho_{NIR} / \rho_{ROT}$	JORDAN (1969)
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{ROT}) / (\rho_{NIR} + \rho_{ROT})$	ROUSE et al. (1973)
Green Normalized Difference Vegetation Index	$Green\ NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{GRÜN}) / (\rho_{NIR} + \rho_{GRÜN})$	GITELSON et al. (1996)
Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index*	$NDVI\ 705 = (\rho_{750} - \rho_{705}) / (\rho_{750} + \rho_{705})$	GITELSON & MERZLYAK (1994)
Structure Intensive Pigment Index*	$SIPI = (\rho_{800} - \rho_{450}) / (\rho_{800} + \rho_{680})$	PEÑUELAS et al. (1995)
Plant Senescence Reflectance Index*	$PSRI = (\rho_{680} - \rho_{500}) / \rho_{750}$	MERZLYAK et al. (1999)
Chlorophyll Reflectance Index*	$Chl-RI = \rho_{860} / (\rho_{708} \cdot \rho_{550})$	GITELSON & MERZLYAK (2004)
Red-Edge Chlorophyll Reflectance Index*	$Chl-RI_{Red-Edge} = (\rho_{750-800}) / (\rho_{695-800}) - 1$	GITELSON & MERZLYAK (2004)
Moisture Stress Index	$MSI = \rho_{1600} / \rho_{820}$	HUNT & ROCK (1989)
Water Index*	$WI = \rho_{900} / \rho_{970}$	PEÑUELAS et al. (1993)
Photochemical Reflectance Index*	$PRI = (\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$	GAMON et al. (1992)
Red-Edge Vegetation Stress Index*	$RVSI = ((\rho_{714} - \rho_{752}) / 2) - \rho_{733}$	MERTON (1998)

(vgl. Tab. 2). Unter den diskutierten Indizes befinden sich traditionelle Indizes wie der SR, der NDVI und der MSI, welche ursprünglich für Multispektralsensoren entwickelt wurden. Von besonderem Interesse sind jedoch Indizes, die für Hyperspektralsensoren konzipiert wurden und für ihre Berechnung sehr enge Spektralbereiche erfordern.

3 Ergebnisse

3.1 Referenzdaten

Während des Experiments wurde die Austrocknung vieler Baumindividuen anhand von Blattfärbungen und Einrollen von Blättern sichtbar. Eine Auskunft über die tatsächliche Veränderung der Bodenfeuchte bzw. den Chlorophyll- und Blattwassergehalt geben experimentelle Messungen (Abb. 3).

Zur Beschreibung des Chlorophyllgehaltes, der den Vitalitätszustand der Pflanzen widerspiegelt, wurden SPAD-Messwerte verwen-

det. Im Laufe der sechs Wochen ist ein kontinuierlicher Abfall der Werte zu beobachten. Dadurch, dass das Experiment bis Ende September dauerte, wird die kontinuierliche Abnahme des Chlorophyllgehaltes in beiden Gruppen durch Beginn der Seneszenz mitgesteuert. In der TSG wird der Abbau von Chlorophyllpigmenten offensichtlich in der letzten Woche durch die Austrocknung verstärkt.

Bei dem Blattwassergehalt ist in der KG keine Abnahme im Laufe der Messperiode von sechs Wochen zu verzeichnen. In der TSG sinkt der Blattwassergehalt erst ab dem vierten Termin, wobei bei Topf 22 eine Abnahme schon nach der dritten Woche zu sehen ist. Trotz des fortschreitenden Austrocknungsprozesses ist der späte Rückgang der Werte darauf zurückzuführen, dass den Bäumen in den ersten drei bis vier Wochen das im Boden gespeicherte Wasser zu Verfügung steht. Dies führt dazu, dass nachweisbare Veränderungen im Blattwassergehalt erst dann sichtbar werden, wenn das Substrat austrocknet und kein pflanzenverfügbares Wasser mehr vorhanden ist.

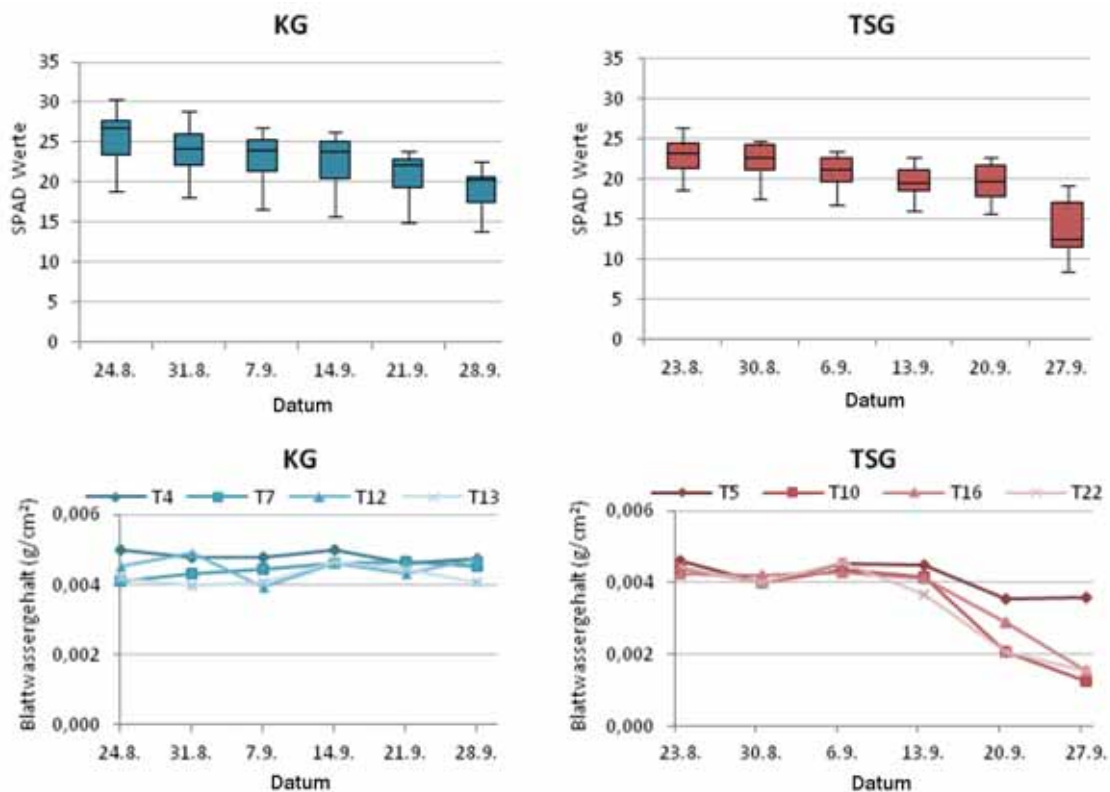


Abb. 3: Entwicklung der SPAD-Werte und des Blattwassergehaltes für die Kontrollgruppe (links) und Trockenstressgruppe (rechts). „T0“ = Topfnummer.

3.2 Nichtabbildende Geländespektrometrie (ASD FieldSpec II)

Spektrale Signaturen

Anhand der spektralen Reflexionssignaturen des Labor- und Geländespektrometers ASD FieldSpec II konnten typische Merkmale der Austrocknung, wie die Abschwächung der Absorption bei den Chlorophyllabsorptionsbanden, die Verschiebung des *Green Peaks* in Richtung des langwelligeren Bereiches, der Anstieg der Reflexion im nahen Infrarot und die Abschwächung der Reflexion in den Wasserabsorptionsbanden beobachtet werden. In Abb. 4 werden die Ergebnisse des ersten (23./24.8.) und letzten (27./28.9.) Messtermins dargestellt.

Schätzung des Chlorophyll- und Blattwassergehaltes mithilfe von Vegetationsindizes

Beim Vergleich der Vegetationsindizes mit dem gemessenen Chlorophyllgehalt wurde festgestellt, dass die Indizes NDVI, SIPI und PSRI, welche die Reflexion im roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums verwenden, nicht sensitiv für ein breiteres Konzentrationsspektrum sind. Die Indexwerte sättigen bei steigendem Chlorophyllgehalt auf und bleiben unverändert (vgl. Abb. 5a). Besonders hohe Korrelationen erzielen Indizes, welche Kanäle im *Red-Edge*-Bereich nutzen (vgl. Abb. 5b). Dazu gehören der NDVI 705, der $Chl-RI_{Red-Edge}$ und der RVSI. Diese Indizes erwiesen sich als sensitiv unabhängig von der Höhe der Blattchlorophyllkonzentration. Sie sind demzufolge in der Lage, die Auswirkungen des Trockenstresses früher wahrzunehmen.

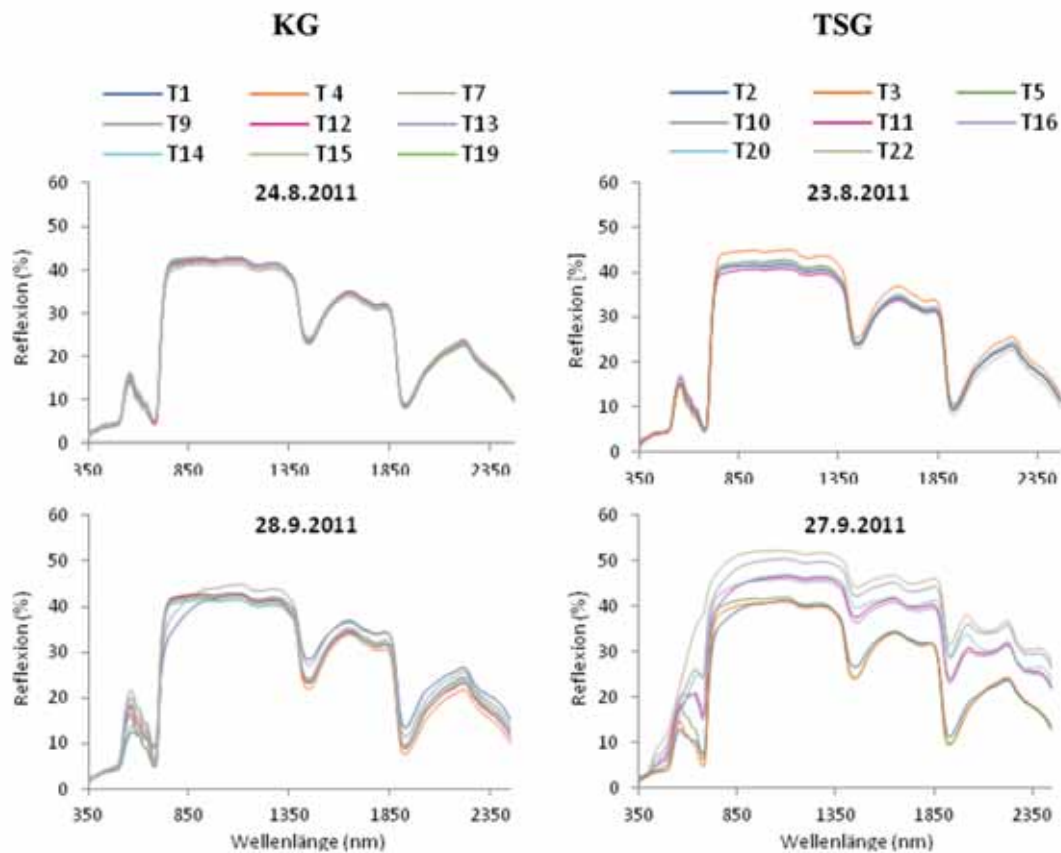


Abb. 4: Spektrale Signaturen (ASD FieldSpec) für die Kontrollgruppe (linke Spalte) und die Trockenstressgruppe (rechte Spalte). „T0“ = Topfnummer.

men, und können somit als potentielle Stres-
sindikatoren verwendet werden.

Obwohl der PRI nicht zu der Gruppe der In-
dizes gehört, die sensitiv auf den Chlorophyll-
gehalt reagieren, zeigt sich trotzdem ein pro-
portionaler Zusammenhang ($R^2 = 0,757$). Des
Weiteren wurden in dieser Arbeit wassersensi-
tative Indizes (MSI und WI) untersucht und
mit dem gravimetrisch ermittelten Blattwas-
sergehalt verifiziert. Alle Indizes zeigen hohe
Korrelationen, die besten Ergebnisse lieferte
der MSI (vgl. Abb. 5c).

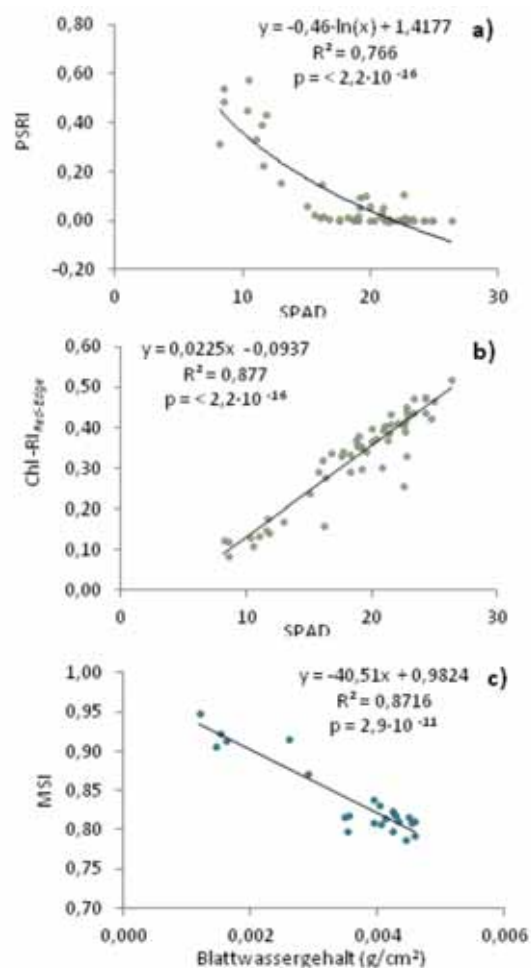


Abb. 5: Zusammenhang zwischen den Vegetationsindizes und den SPAD-Werten (a,b) bzw. dem Blattwassergehalt (c). Bei den SPAD-Werten bzw. dem Blattwassergehalt handelt es sich um Topfmittelwerte gemessen vom 23. August bis zum 27. September in der TSG.

3.3 Abbildende Geländespektrometrie (HySpex VNIR-1600)

Innerhalb der Experimentwochen fanden die spektralen Aufnahmen der Baumgruppen mit der Hyperspektralkamera HySpex zu fünf Zeitpunkten statt. Abb. 6 zeigt exemplarisch die Ergebnisse zu drei Messterminen. Die Signaturen zeigen in diesem Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums einen ähnlichen Verlauf wie die FieldSpec-Signaturen. Bei den Spektralsignaturen ist der *Green Peak* zu sehen, der sich mit der Austrocknung in Richtung des langwelligen Bereiches verschiebt. Die Reflexionssignaturen zeigen außerdem eine deutlich ausgeprägte Wasserabsorptionsbande bei ca. 970 nm. Die Gesamtreflexion ist höher als die Reflexion eines einzelnen Blattes. Die Reflexionsspektren zeigen ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis bis auf den Bereich ab ca. 850 nm. Außerdem wird das Spektrum durch die Sauerstoffabsorptionsbande bei 760 nm beeinflusst.

Die HySpex-Aufnahmen bieten zwei Möglichkeiten, um Vegetationsindizes zu berechnen. Die erste ist die Berechnung der Indizes auf Basis von hyperspektralen Bilddaten. Das Ergebnis ist ein hochaufgelöstes Rasterbild der Baumkronen, in dem einzelnen Pixeln ein bestimmter Indexwert zugeordnet wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Berechnung

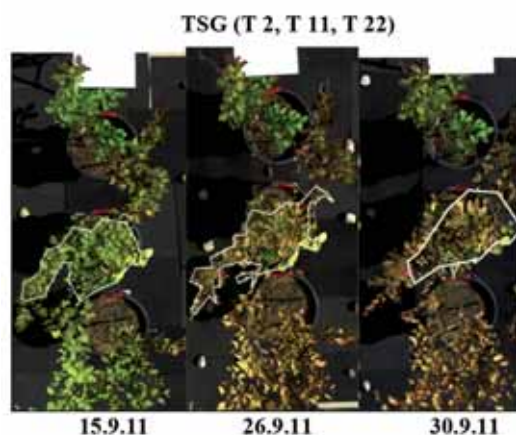


Abb. 6: Echtfarbandarstellung von HySpex-Aufnahmen (Kanäle 55, 41, 12) für die Töpfe 2, 11 und 22 (Trockenstressgruppe; Reihenfolge von oben nach unten) und die Änderung der spektralen Reflexionssignatur für Topf 11. „T0“ = Topfnummer.

der Indizes aus den extrahierten Topfmittelspektren, die in einem linearen Verlauf dargestellt werden.

Das unterschiedliche Verhalten der Indizes über den Messzeitraum zeigt sich auch bei den Indizes auf Basis der HySpex-Messungen. Abb. 7 stellt exemplarisch eine zeitliche Entwicklung des PSRI und PRI der TSG an fünf Messterminen dar. Der PSRI zeigt in früheren Austrocknungsstadien keinen Unterschied in den Reaktionen der verschiedenen Töpfe. Der PRI zeigt schon an den ersten beiden Terminen ein differenziertes Bild der Baumkronen. Das heißt, der Index ist in der Lage, kleinste physiologische Unterschiede zwischen einzelnen Baumindividuen zu identifizieren. Gleichmaßen wie der PRI erwiesen sich die Indizes NDVI 705, RVSI und $\text{Chl-RI}_{\text{Red-Edge}}$ als

sehr sensitiv gegenüber der durch Trockenstress verursachten Veränderungen.

4 Diskussion

Die spektralen Reflexionssignaturen des ASD FieldSpec-Spektrometers zeigen typische Merkmale der Austrocknung. Unterschiedliche Reaktionen der Töpfe innerhalb der Trockenstressgruppe (vgl. Abb. 4) können durch die Beziehung zwischen den Indizes $\text{Chl-RI}_{\text{Red-Edge}}$ und MSI, welche sich für die Schätzung von Chlorophyll- und Blattwasser-gehalt als geeignet erwiesen haben, und den biometrische Kennwerte erklärt werden (vgl. Abb. 8).

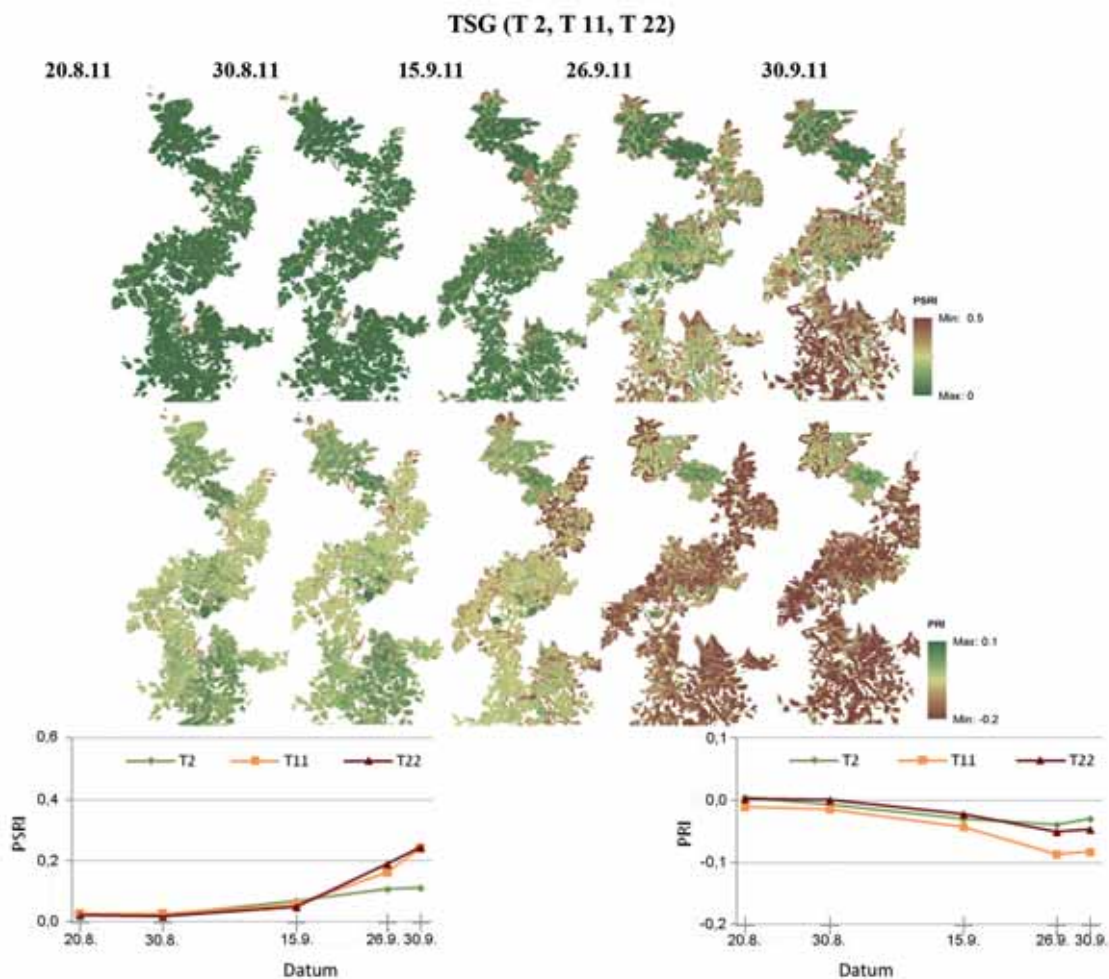


Abb. 7: Verlauf des PSRI und PRI für die Töpfe 2, 11 und 22 der Trockenstressgruppe (Reihenfolge von oben nach unten). „T0“ = Topfnummer.

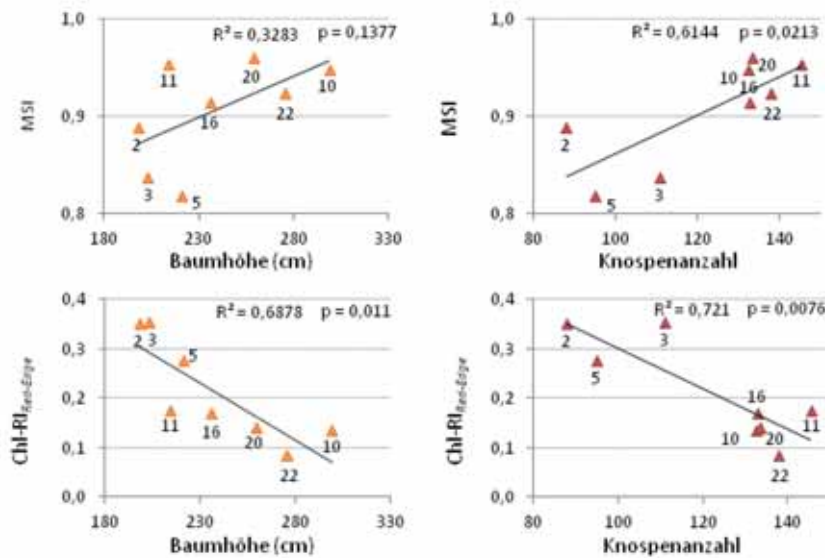


Abb. 8: Zusammenhang zwischen den Vegetationsindizes (MSI und $\text{Chl-Rl}_{\text{Red-Edge}}$) und den pro Topf aufsummierten Baummerkmalen (Baumhöhe, Knospenanzahl).

Bei den HySpex-Aufnahmen können sich auf Grund der Lage der Sauerstoffabsorptionsbande mit einem Maximum bei 760 nm Ungenauigkeiten bei der Berechnung von Indizes, welche diese Wellenlängen verwenden, ergeben. Bei Betrachtung der HySpex-Reflexionssignatur fällt auf, dass das Spektrum in dem Bereich zwischen 746 nm und 764 nm, in dem die Absorptionsbande liegt, verrauscht ist. In unserem Fall konnten zwei Faktoren festgestellt werden, welche zu einer Erhöhung der Indexwerte beitragen. Zum einem ist dies durch das Auftreten des Schattens innerhalb der Baumkronen begründet. Zum anderen verändert sich die Aufnahmegeometrie der Untersuchungspflanzen während der Austrocknung, z. B. Einrollen der Blätter.

Es ist zu empfehlen, den Beginn des Trockenstressexperiments in zukünftigen Studien früher in die Sommermonate zu setzen, um den Einfluss der natürlichen Seneszenz so gering wie möglich zu halten.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Verfahren der abbildenden und nichtabbildenden Spektrometrie getestet, um physiologische Veränderung einzelner Blattorgane und Baumindiv-

viduen von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) während einer sechswöchigen induzierten Trockenstressphase zu untersuchen. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden die relevanten Daten an einer Trockenstressgruppe, welche über den Messzeitraum keine Wasserzufuhr erhielt, und an einer stetig bewässerten Kontrollgruppe gemessen. Während des Experiments fanden Ermittlungen des Boden- und Blattwassergehalts, Chlorophyllmessungen mit dem SPAD-502-Chlorophyllmeter sowie Erhebungen der spektralen Signaturen einzelner Buchenblätter mit dem nichtabbildenden Geländespektrometer ASD FieldSpec II statt. Weiterhin wurden Aufnahmen der Pflanzen mittels der bildgebenden Hyperspektralkamera HySpex durchgeführt. Durch Wassermangel wurde die Aktivität der Photosynthese in den einzelnen Buchenindividuen in unterschiedlichem Ausmaß herabgesetzt, was anhand der experimentellen Befunde und den verwendeten Vegetationsindizes belegt werden konnte.

Danksagung

Unser herzlicher Dank gilt den Mitarbeitern des Faches Umweltfernerkundung und Geoinformatik (Universität Trier) für die tatkräfti-

ge Unterstützung bei der Datenerhebung sowie für ihre wertvollen Anregungen und Ideen während der Auswertung der Daten. Weiterhin bedanken wir uns bei dem Leiter des Lehrstuhls für Geobotanik (Universität Trier) Prof. Dr. WILLY WERNER für sein Engagement und die hilfreichen und konstruktiven Vorschläge.

Literatur

- ALLEN, C.D., MACALADY, A.K., CHENCHOUNI, H., BACHELET, D., MCDOWELL, N., VENNETIER, M., KITZBERGER, T., RIGLING, A., BRESHEARS, D.D., HOGG, E.H., GONZALEZ, P., FENSHAM, R., ZHANG, Z., CASTRO, J., DEMIDOVA, N., LIM, J.-H., ALLARD, G., RUNNING, S.W., SEMERCI, A. & COBB, N., 2010: A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. – *Forest Ecology and Management* **259**: 660–684.
- BOLTE, A., EISENHAEUER, D.-R., EHRHART, H.-P., GROSS, J., HANEWINKEL, M., KÖLLING, C., PROFFT, I., ROHDE, M., RÖHE, P. & AMERELLER, K., 2009: Klimawandel und Forstwirtschaft – Übereinstimmungen und Unterschiede bei der Einschätzung der Anpassungsnotwendigkeiten und Anpassungsstrategien der Bundesländer. – *Landbauforschung – vTI agriculture and forestry research* **59**: 269–278.
- GAMON, J.A., PEÑUELAS, J. & FIELD, C.B., 1992: A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. – *Remote Sensing of Environment* **41**: 35–44.
- GITELSON, A.A. & MERZLYAK, M.N., 1994: Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. – *Journal of Plant Physiology* **143**: 286–292.
- GITELSON, A.A., KAUFMAN, Y.J. & MERZLYAK, M.N., 1996: Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. – *Remote Sensing of Environment* **58**: 289–298.
- GITELSON, A.A. & MERZLYAK, M.N., 2004: Non-destructive assessment of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in higher plant leaves: Principles and algorithms. – STAMATIADIS, S., LYNCH, J.M. & SCHEPERS, J.S. (eds.): *Remote Sensing for Agriculture and the Environment*: 78–94, Ella, Griechenland.
- HUNT, E.R. & ROCK, B.N., 1989: Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectance. – *Remote Sensing of Environment* **30**: 43–54.
- JORDAN, C.F., 1969: Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. – *Ecology* **50**: 663–666.
- MARKWELL, J., OSTERMAN, J.C. & MITCHELL, J.L., 1995: Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. – *Photosynthesis Research* **46**: 467–472.
- MERTON, R.N., 1998: Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and the red-edge vegetation stress index. – *Seventh Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, Pasadena, CA, USA.
- MERZLYAK, J.R., GITELSON, A.A., CHIVKUNOVA, O.B. & RAKITIN, V.Y., 1999: Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. – *Physiologia Plantarum* **106**: 135–141.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., BIEL, C., SERRANO, L. & SAVE, R., 1993: The reflectance at the 950–970 region as an indicator of plant water status. – *International Journal of Remote Sensing* **14**: 1887–1905.
- PEÑUELAS, J., BARET, F. & FILELLA, I., 1995: Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. – *Photosynthetica* **31**: 221–230.
- ROBERTS, D.A., ROTH, K.L. & PERROY, R.L., 2012: Hyperspectral vegetation indices. – THENKABAIL, P.S., LYON, J.G. & HUETE, A. (eds.): *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*: 141–165, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W., 1973: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. – 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351: 309–317, Washington DC, USA.
- SITTE, P., WEILER, E.W., KADEREIT, J.W., BRESINSKY, A. & KÖRNER, C., 2002: *Strasburger Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*. – 35. Auflage, 1124 S., Spektrum, Heidelberg.

Adresse der Autoren:

OKSANA STERN, BARBARA PASCHMIONKA, JOHANNES STOFFELS, HENNING BUDDENBAUM & JOACHIM HILL, Fernerkundung und Geoinformatik, Universität Trier, Behringstr. 15, D-54286 Trier, e-mail: {stern}{s6bapasc}{stoffels}{buddenbaum}{hill}@uni-trier.de

Manuskript eingereicht: Juni 2013
Angenommen: November 2013



An AdaBoost Ensemble Classifier System for Classifying Hyperspectral Data

POURIA RAMZI, FARHAD SAMADZADEGAN, Tehran, Iran & PETER REINARTZ, Oberpfaffenhofen

Keywords: AdaBoost, band clustering, hyperspectral data, multiple classifier systems, support vector machines

Summary: This paper presents a new multiple classifier system based on AdaBoost to overcome the high dimensionality problem of hyperspectral data. The hyperspectral data are first split into a number of band clusters based on the similarities between the contiguous bands, and each band group is considered as an independent data source. The redundant bands in each cluster are then removed using branch and bound technique. Next, a support vector machine (SVM) is applied to each cluster and the outputs are combined using the weights calculated in AdaBoost iterations. Experimental results with AVIRIS and ROSIS datasets clearly demonstrate the superiority of the proposed algorithm in both overall and single class accuracies when compared to other multiple classifier systems. For AVIRIS data, which contains classes with greater complexity and fewer available training samples, the differences between the overall accuracies of the AdaBoost results are significantly higher compared to those of the other methods, and more pronounced than for the other dataset. In terms of class accuracies, the proposed AdaBoost approach also outperforms other methods in most of the classes.

Zusammenfassung: Klassifizierung von Hyperspektraldaten mit einem multiplen Klassifizierungssystem auf AdaBoost Basis. In diesem Beitrag wird ein neues multiples Klassifizierungssystem auf AdaBoost Basis entwickelt, um das Problem der hohen Dimensionalität von Hyperspektraldaten zu verringern. Die Hyperspektraldaten werden zunächst in eine Reihe von Spektralkanal-Clustern unterteilt, welche auf Ähnlichkeiten in benachbarten Kanälen beruhen. Jedes Cluster wird als unabhängige Daten-Teilmenge für die weitere Verarbeitung verwendet. Zunächst werden die redundanten Kanäle in jedem Cluster entfernt und jeweils ein Support-Vector-Machine (SVM) Klassifizierungsalgorithmus angewendet. Die Ergebnisse werden gewichtet kombiniert, wobei die jeweiligen Gewichte aus den AdaBoost Iterationen abgeleitet werden. Experimentelle Ergebnisse mit AVIRIS und ROSIS Datensätze zeigen deutlich die Überlegenheit des vorgeschlagenen Algorithmus im Vergleich zu anderen multiplen Klassifizierungssystemen, sowohl bei der Klassifizierungsgenauigkeit einzelner Klassen als auch bei der Gesamtgenauigkeit. Für AVIRIS Daten, welche Klassen mit höherer Komplexität enthalten und für die weniger Trainingsdaten zur Verfügung stehen, sind die Gesamtgenauigkeiten des AdaBoost Verfahrens signifikant höher und deutlich auffallender als bei dem anderen verwendeten Datensatz. In Bezug auf die Genauigkeit einzelner Klassen übertrifft der vorgeschlagene AdaBoost Ansatz die anderen Methoden ebenfalls für die meisten Einzelklassen.

1 Introduction

Hyperspectral sensors make it possible to obtain high-dimensional data with high spectral and spatial resolutions, which makes discrimi-

nation among similar land-cover classes easier. However, the large number of bands can become a drawback when classifying hyperspectral data using statistical methods (LANDGREBE 2003, RICHARDS 2013). In other words,

when the number of training samples is relatively small with respect to the number of features, the well-known problem of the curse of dimensionality, also known as the Hughes phenomenon, occurs (HUGHES 1968). In this situation, the model is overfitted to the training data and this can lead to poor generalisation capabilities for the classifier. In recent years, extensive research has been performed in the area of hyperspectral image classification (CHI et al. 2008, XIE et al. 2011, VILLA et al. 2011).

One of the most popular and well-known classification methods that have been successfully applied on hyperspectral data are support vector machines (SVMs). They were demonstrated to perform better than, or at least equivalently to, many other classifiers when applied to hyperspectral data (BRAUN et al. 2012, CAMPS-VALLS & BRUZZONE 2005, LI et al. 2013, TARABALKA et al. 2010). Another category of classification techniques that is highly capable of classifying hyperspectral data are multiple classifier systems (MCSs) or classifier ensembles, which are used to make highly accurate learning algorithms by combining a set of moderately accurate classifiers (BRIEM et al. 2002, CEAMANOS et al. 2010, CHAN & PAELINCKX 2008). Among the ensemble methods, one of the most popular ones is AdaBoost introduced by FREUND & SCHAPIRE (1999), which makes use of a set of component classifiers by changing the weights of training samples during the boosting iterations.

Because SVMs and AdaBoost work in different ways, combining them to benefit from the capabilities of both seems desirable. It has been demonstrated that the effectiveness of ensemble methods, such as AdaBoost, depends on both the accuracies of component classifiers and the diversities between them; in other words, the ensemble classification performance is only improved if the accuracy and diversity of ensemble classifiers are well-balanced (PRASAD & BRUCE 2008, VALENTINI & DIETTERICH 2004). In our experiment, diverse SVM classifiers are trained by splitting the hyperspectral bands into several band groups based on the similarities between the adjacent bands and removing the non-informative bands in each cluster and considering the SVM applied on each set as a component

classifier in boosting. Because each band cluster has different spectral properties, the SVM classifiers applied to them seem to be diverse enough to satisfy the ensemble system. One of the main strengths of this technique in comparison to other ensemble methods is that for each iteration in AdaBoost, the system will concentrate on previously misclassified samples and attempt to learn them in different parts of that data with different spectral characteristics. In addition to this, SVM kernel parameters for each data cluster are defined according to its characteristics. It is more reasonable than using just only one pair of kernel parameters for training the whole dataset. The results of this system are subsequently compared with another multiple classifier system utilising majority voting to combine decisions of SVM component classifiers applied on band clusters (which is called the MV-SVM), a single SVM applied on all bands of the datasets (known as the SVM-All in literature), and a single SVM applied on the selected bands from different clusters of datasets (the SVM-Sel in this paper) in terms of overall, average and single class accuracies, kappa parameters and training times.

Following the introduction, the concepts of band clustering of hyperspectral data, SVMs, and MCSs are reviewed, respectively. Then, the proposed AdaBoostSVM technique to classify hyperspectral data is described in section 2. To evaluate the performance of the proposed algorithm and compare it with other classification methods, the results of applying these classifiers to two hyperspectral datasets are presented in section 3. Lastly, in section 4 a general discussion and conclusions are drawn.

1.1 *Band Clustering*

The aim of band clustering for hyperspectral data is that adjacent highly correlated bands should be merged into one group and bands with little redundancy should be separated into different groups (LI et al. 2011). This process guarantees that different subsets (clusters) have spectral heterogeneity for further tasks. In recent years, many studies have proposed dividing hyperspectral bands into dif-

ferent similar groups as a primary step for feature selection. ZHAO and colleagues partitioned the hyperspectral data into several groups using correlation coefficients. A non-parametric clustering method was then used to extract the joint spatial-spectral features of the hyperspectral data (ZHAO et al. 2011). In MARTINEZ-USO et al. (2007), the bands are grouped using information measures such as mutual information (MI) or the Kullback–Leibler divergence to reduce data redundancy and non-useful information. To calculate MI, entropy and joint entropy measures of spectral bands are calculated. If a discrete random variable x has the probability density function $p(x)$, the entropy of X is defined as:

$$H(X) = -\sum p(x) \log(p(x)) \quad (1)$$

For two discrete random variables X and Y , with joint probability density function $p(x, y)$, the joint entropy of X and Y is defined as:

$$H(X, Y) = -\sum \sum p(x, y) \log(p(x, y)) \quad (2)$$

The MI is used to measure the correlation between two random variables and it is defined as:

$$\begin{aligned} MI(X, Y) &= H(X) + H(Y) - H(X, Y) \\ &= H(X) - H(X|Y) \end{aligned} \quad (3)$$

The redundancy between two bands is greater when the value of MI is larger (LI et al. 2011).

GUO et al. (2006) further found that when the bands are highly correlated, the grouping based on a simple criterion such as correlation coefficient matrices or mutual information by itself would not be suitable as a similarity measure. The reason is that it can be low because either the two bands present a weak relation (such as it should be desirable) or the entropies of these variables are small (in such a case, the variables contribute with little information). Considering this, in BIGDELI et al. (2013) and LI et al. (2011) mutual information is initially employed to partition the bands into disjoint subspaces and a band selection technique is then employed to search for the optimal combination of bands.

After clustering, each cluster is normally treated as a feature set in an ensemble classification system (BIGDELI et al. 2013, LIAO & MOODY 1999, MARTINEZ-USO et al. 2007).

1.2 SVMs

The aim of SVMs is to separate two classes by fitting an optimal linear separating hyperplane to the training samples. The optimisation problem is being solved to maximise the margins between the hyperplane. If the samples are not linearly separable in the original space, kernel functions are used to map data into higher dimension where they can be separated with linear decision functions. This space is called Hilbert space (VAPNIK & VAPNIK 1998). The most widely used kernel in remote sensing is the Gaussian radial basis function (RBF) (BIGDELI et al. 2013, CEAMANOS et al. 2010, SAMADZADEGAN et al. 2012, SCHÖLKOPF & SMOLA 2001). For RBF-SVMs, the model parameters include the Gaussian width σ and the regularisation parameter C . Because SVMs are now very common in remote sensing communities, we omit their principles and concepts here. Instead, the reader is referred to SCHÖLKOPF & SMOLA (2001) and WATANACHATURAPORN & ARORA (2004). SVMs are inherently binary classifiers, but they can be extended to solve multiclass problems. One method for this support is based on the combination of binary classifiers. These concepts, one-against-one and one-against-all methods are demonstrated in MELGANI & BRUZZONE (2004) and in WATANACHATURAPORN & ARORA (2004).

SVMs work satisfactorily when small training sets are available on high-dimensional feature spaces (PAL & MATHER 2006) and thus have attracted increased attention in remotely sensed hyperspectral communities. MELGANI & BRUZZONE (2004) applied SVMs for classification of hyperspectral data and obtained better classification results compared to other common classification methods. In a work presented by BRAUN et al. (2010), SVMs are utilised to classify vegetation from hyperspectral data and the results are compared with other classifiers such as maximum likelihood and spectral angle mapper. TARABALKA et al. (2010) presented a method for spectral-spatial

classification of hyperspectral images using SVMs. These authors' method offered improved accuracy in comparison to some other classification approaches.

1.3 MCSs

MCSs represent approaches that use more than one classifier and combine their decisions with the goal of achieving more accurate results. These systems have been recently reviewed in the context of remote sensing and yield satisfactory results when dealing with hyperspectral and multi-source data (CEAMANOS et al. 2010, CHAN & PAELINCKX 2008).

Ensemble classification methods are divided into two primary categories. In the first group, different learning algorithms are applied on the same training set, and their decisions are later combined (BENEDIKTSSON & KANELLOPOULOS 1999). The second approach is based on only one learning algorithm, and the ensemble is created by changing the training set or the feature subsets. The drawback of ensembles using different learning algorithms for analysis of hyperspectral data is that they add greater computational burden to a procedure already complicated by high-dimensional inputs (CHAN & PAELINCKX 2008). As a result, in most remote sensing research based on combining classifiers, the second concept is utilised (BIGDELI et al. 2013, CAMPS-VALLS & BRUZZONE 2005, CEAMANOS et al. 2010).

Bagging (BREIMAN 1996) and boosting (FREUND & SCHAPIRE 1999) are two main methods of the second approach and are reported to be effective in increasing classification accuracy (OPELT et al. 2006, VIOLA & JONES 2001). The most popular boosting algorithm is AdaBoost (adaptive boosting) which has been extensively used in different applications such as remote sensing in recent years (CAMPS-VALLS & BRUZZONE 2005, CHAN & PAELINCKX 2008, FRICK et al. 2011). The algorithm takes a training set and a distribution or a set of weights over the training set as inputs. AdaBoost then calls the learning algorithm in a series of rounds. With each round, the weights of incorrectly classified examples are increased such that the weak learner is forced to focus on the hard examples in the training set. Fi-

nally, the classifiers of different iterations are combined with weighted voting (FREUND & SCHAPIRE 1999). AdaBoost is initially defined to solve binary problems; however, it can be generalised to perform multiclass classifications. The most straightforward generalisations are known as AdaBoost.M1, AdaBoost.M2, and AdaBoost.MH (FREUND & SCHAPIRE 1999, SCHAPIRE & SINGER 1998).

1.4 Multiple Classifier Systems with SVMs as Base Classifiers

The concepts of SVMs and MCSs are based on different ideas. Nevertheless, the two approaches are not exclusive, and combining them in a complementary approach seems desirable (WASKE et al. 2010). Several studies have tried to use SVMs in multiple classifier systems (CEAMANOS et al. 2010, LI et al. 2008, VALENTINI & DIETTERICH 2004). According to these researches, the use of SVMs in ensemble classifier systems seems to be controversial (LI et al. 2008); in several studies, the classification performance of ensembles is better (BIGDELI et al. 2013, CEAMANOS et al. 2010), whereas other research, the results of SVM ensembles are not better than that of a single SVM (WANG et al. 2009). In other words, it seems that some considerations must be taken into account when using SVMs as base classifiers in an ensemble system. In VALENTINI & DIETTERICH (2004), the effectiveness of ensemble methods depends on the accuracy, diversity and learning characteristics of base learners. LI and colleagues further proved that the ensemble can exhibit a good performance only when the accuracy and diversity of the classifiers are well-balanced (LI et al. 2008). Diversity is one of the most important factors in the success of every ensemble classifier system. Diversity means the errors of different classifiers should be uncorrelated or different classifiers should create errors for different data samples (LI et al. 2008, KUNCHEVA & WHITAKER 2003). The required diversity among the component classifiers in an ensemble system can be satisfied by changing the training samples (KUNCHEVA & WHITAKER 2003), thereby weakening the base classifiers (WICKRAMARATNA et al. 2001), or changing the

feature sets (BIGDELI et al. 2013, CEAMANOS et al. 2010).

2 Proposed Method

In this paper, an AdaBoost ensemble classification method based on SVMs as base classifiers is proposed to classify the clusters extracted from hyperspectral bands. An overview of our proposed method is illustrated in Fig. 1.

The proposed strategy starts by splitting the hyperspectral data into a few band clusters based on MI between the contiguous bands. Afterwards, the rough hyper-parameters for each data source are calculated using a 5-fold cross validation technique also known as grid search. Because the bands in each cluster are highly correlated, they may contain data redundancies. To reduce the dimension of each cluster, a band selection technique is applied, and only the useful bands are retained in each of the clusters. Among these feature selection techniques, the optimal ones are the exhaustive search and the branch and bound (BB) algorithm (GUYON & ELISSEE 2003). When the dimensionality of the original feature space is large, the BB algorithm is preferred to the exhaustive search methods. Exhaustive search is only applicable for low-dimension problems (LI et al. 2011) because the number of possible feature sets that need to be searched becomes excessively large as the dimensionality of the original feature space increases. Hence, similar to LI et al. (2011), we utilise the adaptive branch and bound (ABB) algorithm proposed in NAKARIYAKUL & CASASANT (2007). Finally,

the results of the band selection stage together with the rough kernel parameters for all the clusters lead to the final decision in AdaBoost.

2.1 Feature/Band Selection

In our algorithm, the most informative set of bands in each cluster is defined to maximise the classification performance of each ensemble classifier. Because the bands in each cluster are highly correlated, they may contain data redundancies. To reduce the dimension of each cluster, the adaptive branch and bound (ABB) technique is applied, and only the useful bands are retained in each cluster. In the ABB algorithm, one band is pruned each time, and an SVM classifier is trained on the remaining bands. After all the bands are pruned out or the minimum number of bands is reached, the band combination with the highest classification accuracy is chosen as the final result. In this paper, similar to LI et al. (2011), the pruning process is stopped when there are three bands left in each cluster.

2.2 Proposed AdaBoostSVM System

The main idea of our proposed AdaBoostSVM method is similar to that introduced in LI et al. (2008). Nevertheless, there are major differences between these two methods. As mentioned before, the component classifiers in AdaBoost must satisfy the classification accuracy/diversity balance to achieve an increased performance. In LI et al. (2008) the whole

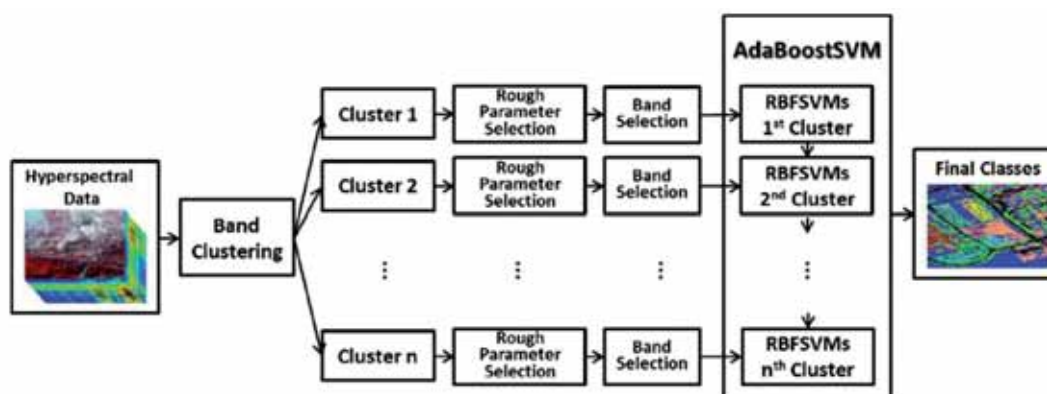


Fig. 1: An AdaBoostSVM system based on the band clustering of hyperspectral data (RBF SVM = radial basis function support vector machine).

dataset is used in different boosting iterations and the required diversity for component classifiers is satisfied by changing the RBF kernel parameter σ in different iterations. However, in our proposed AdaBoostSVM method, the component classifiers are diversified by using different feature subsets in each of the iterations and unlike Li et al. (2008), only the optimum values of kernel parameters for each band cluster are used to make the final decision.

The proposed AdaBoost algorithm takes a training set (X) with labels (Y) in the form $\{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}$ and a distribution or a set of weights over the training set w_i^1 as inputs. The weights are initially set to 1. Then, in each boosting iteration the rough values of the SVM kernel parameters for one of these clusters are first calculated using a 5-fold cross-validation technique. The search range for C is (1 – 200) and for σ is (0 – 20). This cross validation and training of the SVMs are performed using LibSVM (CHEN & LIN 2011). To handle multiclass problems, a one-against-one strategy is preferred to a one-against-all strategy based on comparisons performed in HSU & LIN (2002). Next, the most informative set of bands in that cluster are defined using the ABB technique.

Because the performance of RBF-SVMs strongly depends on σ (LI et al. 2008, VALENTINI & DIETTERICH 2004), using a rough value of C , the exact value of σ is determined in an iterative manner for each SVM applied to one subset of bands. This approach is much faster than finding the best values of both parameters at the same time while using techniques as cross-validations. To do this, for each cluster j , the kernel parameter σ is decreased slightly, and an RBF-SVM is applied on the training set. The training error ($\epsilon_{\sigma_i}^j$) for each of these classifiers ($h_{\sigma_i}^j$) is calculated (4).

$$h_{\sigma_i}^j : \epsilon_{\sigma_i}^j = \sum_{i=1}^N w_i^j [h_{\sigma_i}^j(x_i) \neq y_i] \quad (4)$$

The classifier with the lowest training error is selected as the component classifier for this cluster (5).

$$h_j : \epsilon_j = \min(\epsilon_{\sigma_i}^j) \quad (5)$$

If this training error is less than 0.5, the weights of incorrectly classified training examples for this cluster will then be increased such that the base classifier is forced to focus on the hard examples in the training set of the next band clusters (6).

$$w_i^{j+1} = \frac{w_i^j \exp(-\alpha_j [h_j(x_i) \neq y_i])}{C_j} \quad (6)$$

where C_j is a normalization constant: $C_j = \sum_{i=1}^N w_i^{j+1} = 1$. The weight of the component classifiers are then calculated by (7).

$$\alpha_j = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j} \right) \quad (7)$$

And finally, after all boosting iterations, the classifiers h_1, \dots, h_T are combined with weighted voting (8).

$$f(x) = \max \left(\sum_{j=1}^{\text{no. of clusters}(T)} \alpha_j h_j(x) \right) \quad (8)$$

As mentioned earlier, there are many modifications to generalise AdaBoost algorithm to support multiclass problems. These methods are evaluated in this research work and did not observe a meaningful difference in their performance. Thus, in the rest of this paper, AdaBoost.M2 has been used since it is faster and easier to implement.

3 Experimental Results

In this section, we evaluate our proposed methods by two real hyperspectral datasets. Our experimental analysis is organized into two main experiments. In the first experiment, the effectiveness of our algorithm is evaluated in comparison to some other classification strategies applied to hyperspectral data. The second experiment aims at analyzing the effect of training sample size on the performance of the utilised methods.

3.1 Datasets

To evaluate the potential of the proposed methods, two hyperspectral datasets which are acquired by the AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) sensor and the ROSIS-3 (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) sensor are used. The first dataset of AVIRIS is known for the complexity of the conveyed classification problem which covers an area of mixed agriculture and forest landscape in the Indian Pine area and was collected in June 1992 (WATANACHATURAPORN & ARORA 2004). The size of this image data is 145×145 pixels and the scene comprises 220 spectral channels with the nominal spectral resolution of 10 nm, a moderate spatial resolution of 20 m by pixel, and 16bit radiometric resolution. After an initial screening, several spectral bands were removed from the dataset due to noise and water absorption phenomena, leaving a total of 200 channels to be used in the experiments (Fig. 2a, b). The second dataset was acquired from Pavia University using the ROSIS-3 sensor during a flight campaign

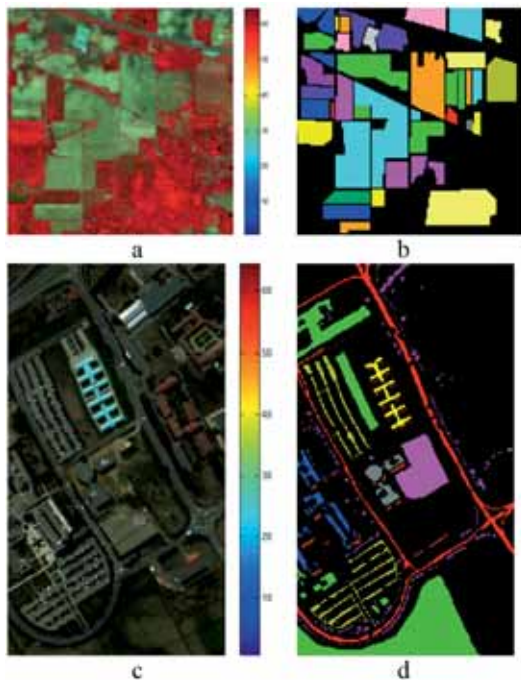


Fig. 2: Hyperspectral datasets. (a) Pseudo-colour AVIRIS image, (b) AVIRIS Indian Pine ground truth, (c) Pseudo-colour ROSIS Pavia image, (d) ROSIS Pavia ground truth.

over Pavia, northern Italy. For the ROSIS data, the number of spectral bands is 115. After removing some bands due to noise, 103 bands remain. This dataset exhibits 610×340 pixels with 1.3 metre per pixel spatial resolution (Fig. 2c, d). For AVIRIS and ROSIS datasets, field-surveyed maps consist of 16 and 9 classes respectively and one unclassified class.

3.2 Experimental Setup

Before the classification, some pre-processing should be performed on these data clusters. Data sources should be scaled to the range (0–1). This eases the tuning of the SVM kernel parameters (CHEN & LIN 2011).

In all the experiments, approximately 10% of the randomly selected samples in each class are considered as training set and the rest are used for evaluation. To decrease variations in the classification process, all of the experiments are repeated 10 times on randomly selected samples, and the results are averaged. For the MV-SVM, the SVM-All, and the SVM-Sel approaches, the kernel parameters are defined using grid search 5-fold cross validations. To evaluate the performance of different methods, the Kappa coefficient and the overall accuracy are usually used (CONGALTON et al. 1991). Moreover, producer's accuracy is utilised to measure the accuracy of each class.

In addition to overall and single class accuracies, the computational time spent on each method is presented in seconds. It is based on a Pentium IV machine with a 2.20 GHz Dual Core Processor and 4 GB of memory.

3.3 Output Results on First Dataset

The first step is to perform band clustering based of the MI between adjacent bands. Depending on the local minima values, various decompositions can be considered Fig. 3.

We have evaluated different decompositions and found that the one with seven clusters outperforms others in terms of classification performance. Details of these clusters and overall accuracies of different component classifiers in our AdaBoostSVM system are given in Tab. 1.

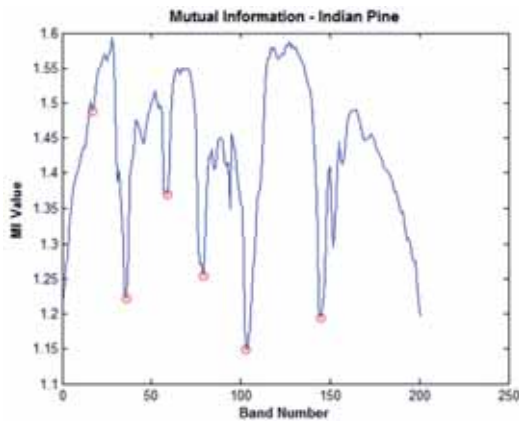


Fig. 3: Band clustering of the Indian Pine dataset based on MI calculations. Red circles define the bands for each cluster.

The results of the proposed AdaBoostSVM and the ensemble classification system utilising majority voting (the MV-SVM) algorithms as well as the SVM-All and the SVM-Sel are compared in Tab. 2 in terms of the accuracies of each of the classes, the overall accuracy and the Kappa parameter. As can be seen, although in some classes such as classes #4 and #15 the accuracies of the AdaBoostSVM are less than those of the SVM-Sel and MV-SVM, in almost half of the classes, the improvement of accuracies by the AdaBoostSVM is significantly higher. The classification maps obtained using these four methods are illustrated in Fig. 4. It is obvious that the map achieved by the AdaBoostSVM appears more

Tab. 1: Final band clustering results on the Indian Pine dataset.

Clusters	1	2	3	4	5	6	7
Bands	1–15	16–36	37–59	60–79	80–102	103–146	147–200
Accuracy (%)	56.19	64.13	63.78	69.56	69.01	66.78	71.22

Tab. 2: Results of applying the proposed method on Indian Pine dataset (MV = majority voting, Sel = applied to selected bands (%)).

Class	Colour	Land Cover Class	Samples	AdaBoost SVM	MV SVM	SVM-Sel (133 bands)	SVM-All (202 bands)
1		Alfalfa	54	95.45	100.00	90.63	53.06
2		Corn-no till	1 434	88.84	80.03	81.87	80.32
3		Corn-minimum till	834	85.91	87.26	78.16	65.38
4		Corn	234	71.12	86.92	85.37	53.55
5		Grass/pasture	497	95.47	94.78	85.68	90.82
6		Grass/trees	747	96.65	89.09	94.20	98.21
7		Grass/pasture-mowed	26	100.00	100.00	93.75	47.82
8		Hay-windrowed	489	98.46	98.46	96.59	98.35
9		Oats	20	100.00	100.00	91.67	55.56
10		Soybeans-no till	968	90.82	91.42	81.97	88.06
11		Soybeans-minimum till	2 468	88.75	67.50	88.83	87.08
12		Soybeans-clean till	614	84.52	87.41	80.29	78.84
13		Wheat	212	98.82	99.40	97.38	99.48
14		Woods	1 294	97.00	90.07	90.13	94.76
15		Building-grass-trees-drives	380	74.44	84.70	81.57	49.42
16		Stone-steel towers	95	97.77	89.80	92.98	74.12
Kappa				0.89	0.78	0.85	0.82
OA				91.03	81.52	86.53	84.15
Time				345 s	296 s	84 s	208 s

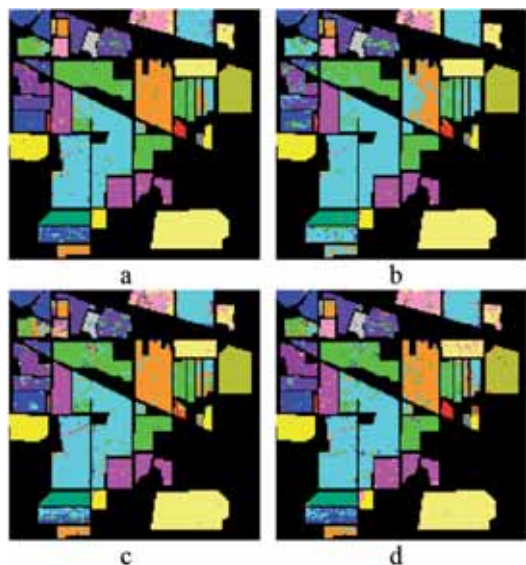


Fig. 4: Classification maps of the AVIRIS Indian Pine dataset. (a) AdaBoostSVM, (b) MV-SVM, (c) SVM-Sel, (d) SVM-All.

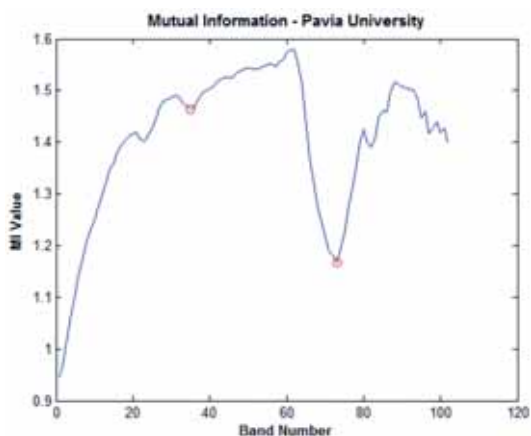


Fig. 5: Band clustering of the Pavia dataset based on the MI.

Tab. 3: Final band clustering results on Pavia dataset.

Clusters	1	2	3
Bands	1 – 38	39 – 73	74 – 103
Accuracy (%)	82.39	88.99	91.34

homogeneous than the others, which is indicative of superior classification performance.

In the last row of Tab. 2, the computational time spent on each method to fulfil is also expressed in seconds. The AdaBoostSVM as it is performed in a couple of iterations takes a longer time, 345 seconds, but not much more than the other methods.

3.4 Output Results on Second Dataset

The same experiments are repeated on the second dataset (the ROSIS Pavia University). These 103-band data are divided into three clusters using the MI method (Fig. 5).

The number of spectral bands contained in each of the clusters is given in Tab. 3. The four classification methods are later applied on these three data sources.

The classification results in terms of each class and overall accuracies together with the computational times are given in Tab. 4.

Similar to the other dataset, the results of the AdaBoostSVM on the Pavia University dataset exhibit greater accuracies than those for the MV-SVM, the SVM-Sel and the SVM-All. In most of the nine classes, the AdaBoostSVM outperforms the other methods. This result is particularly evident for classes exhibiting lower accuracies. But the overall differences are not as high as in the first experiment. The classification maps of these methods are illustrated in Fig. 6.

4 Conclusions and Discussion










The classification of hyperspectral data was addressed and evaluated using ensemble classifier systems based on AdaBoost using SVMs as base classifiers. The proposed method relies on combining SVM classifiers that are trained on different data clusters defined according to the correlation matrix of the spectral bands. This algorithm has been compared with an ensemble classification system using majority voting to combine SVMs applied on band clusters (the MV-SVM), a single SVM applied on selected bands from the whole datasets (the SVM-Sel) and a single SVM applied

on all of the spectral bands (the SVM-All). All the techniques have been evaluated using two standard hyperspectral datasets. In both datasets, the AdaBoostSVM outperforms the other three methods in terms of accuracy. For classification of the Indian Pine data, the differences between the overall accuracy of the AdaBoostSVM and those of the other methods vary between 4.50% and 9.51%, being greater for the Pavia University dataset. As

observed, the overall and single class accuracies achieved in the Indian Pine dataset are lower than that of the Pavia data, which may be attributable to two reasons.

First, the size of the Indian Pine dataset is small compared to the other dataset; therefore, fewer training samples are available for some classes, which decrease the classification performance. This finding has been observed and reported by some other research-

Tab. 4: Results of applying the proposed method on the Pavia University dataset (%).

Class	Colour	Land Cover Class	Samples	AdaBoost SVM	MV SVM	SVM-Sel (63 bands)	SVM-All (103 bands)
1		Asphalt	6 631	94.14	89.86	93.64	94.27
2		Meadows	18 649	98.27	94.01	97.21	95.00
3		Gravel	2 099	80.78	88.35	85.00	81.10
4		Trees	3 064	95.40	95.58	95.11	95.09
5		Painted metal sheets	1 345	99.26	100	98.88	100
6		Bare Soil	5 029	90.57	94.65	90.34	92.87
7		Bitumen	1 330	87.47	89.37	89.47	73.43
8		Self-Blocking Bricks	3 682	91.31	82.08	89.31	84.33
9		Shadows	947	99.76	100	99.74	99.76
Kappa				0.93	0.90	0.92	0.92
OA				94.79	92.35	93.69	92.53
Time				445 s	370 s	117 s	183 s

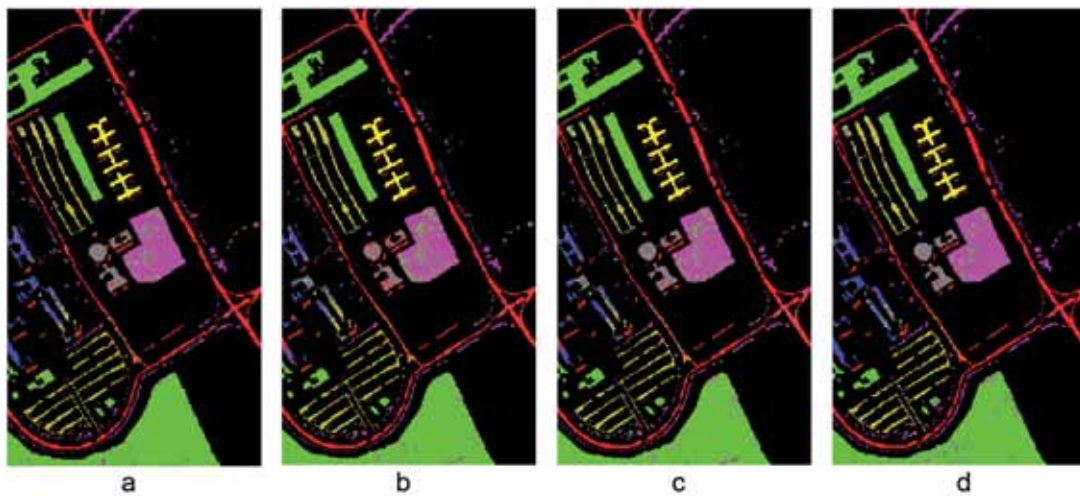


Fig. 6: Classification maps of the ROSIS Pavia University dataset. (a) AdaBoostSVM, (b) MV-SVM, (c) SVM-Sel, (d) SVM-All.

ers such as CEAMANOS et al. (2010) too. Second, classification of the Indian Pine dataset is inherently difficult because this area is covered with mixed agriculture and forestry landscapes, and the data were collected at a time when most of the crops in the test site had not reached maximum ground cover (CEAMANOS et al. 2010). Some classes are homogeneous areas that can be clearly defined; therefore, the accuracies achieved for these classes are high using all methods. By contrast, classes such as #2 (Corn-no till), #3 (Corn-minimum till), #4 (Corn), #11 (Soybeans-minimum till), #12 (Soybeans-clean till), and #15 (Building-grass-trees-drives) can be misclassified in certain parts because they have subclasses (no till, minimum till, clean till) or consist of different elements (Building-grass-trees-drives).

Similar results for the Indian Pine classes have also been reported by CAMPS-VALLS & BRUZZONE (2005), LI et al. (2013), and TARABALKA et al. (2010). By contrast, because the Pavia University dataset is less complex and for all classes, sufficient training samples are available, the classification performance for this dataset is also high.

Among our datasets, the classification of the Pavia University is more time consuming than that of Indian Pine, which is due to the dimension of data; the computing time increases significantly with a greater number of bands and training samples. Nevertheless, the time is important only when the classification must be performed in a short period of time, such as in emergency situations or online applications, or repeated frequently. For the application in this study, the computational time does not seem to be significant.

To conclude, the proposed method seems to be applicable and beneficial for the classification of hyperspectral data since it results in higher classification accuracies and relies on common and extensively-used concepts of SVM and AdaBoost, and can be simply integrated in existing remote sensing applications. In future research, we shall evaluate the performance of other band clustering and band selection methods and will utilise spatial features and other data sources in our classification process. Furthermore, we will analyse the applicability of the proposed method to handle high-dimensional datasets like multi-temporal

time series. The optimisation of our algorithm to reduce the computational burden and classification problems will also be investigated.

Acknowledgements

The authors would like to thank Prof. D. LANDGREBE and Prof. P. GAMBA for making the hyperspectral datasets available, and C.C. CHEN and C.J. LIN for the LibSVM codes. Furthermore, we would also like to thank the associate editor who handled our paper and the two anonymous reviewers for their constructive comments and suggestions.

References

- BENEDIKTSSON, J.A. & KANELLOPOULOS, I., 1999: Classification of Multisource and Hyperspectral Data Based On Decision Fusion. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **37** (3):1367–1377.
- BIGDELL, B., SAMADZADEGAN, F. & REINARTZ, P., 2013: Band Grouping Versus Band Clustering In SVM Ensemble Classification Of Hyperspectral Imagery. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **79** (6): 523–534.
- BRAUN, A.C., WEIDNER, U. & HINZ, S., 2010: Support Vector Machines for Vegetation Classification A Revision. – *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **2010** (4): 273–282.
- BRAUN, A.C., WEIDNER, U. & HINZ, S., 2012: Kernel Composition with the One-Against-One Cascade for Integrating External Knowledge into SVM Classification. – *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **2012** (4): 371–384.
- BREIMAN, L., 1996: Bagging Predictors. – *Machine Learning* **26** (2): 123–140.
- BRIEM, G.J., BENEDIKTSSON, J.A. & SVEINSSON, J.R. 2002: Multiple Classifiers Applied to Multisource Remote Sensing Data. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **40** (10): 2291–2299.
- CAMPS-VALLS, G. & BRUZZONE, L., 2005: Kernel-based Methods For Hyperspectral Image Classification. – *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* **43** (4):1351–1362.
- CEAMANOS, X.R., WASKE, B., BENEDIKTSSON, J.A., CHANUSSOT, J., FAUVEL, M. & SVEINSSON, J., 2010: A Classifier Ensemble Based on Fusion of Support Vector Machines for Classifying Hyperspectral Data. – *International Journal of Image and Data Fusion* **1** (4): 293–307.

- CHAN, J.C.W. & PAELINCKX, D., 2008: Evaluation of Random Forest and Adaboost Tree-based Ensemble Classification and Spectral Band Selection for Ecotope Mapping Using Airborne Hyperspectral Imagery. – *Remote Sensing of Environment* **112** (6): 2999–3011.
- CHEN, C.C. & LIN, C.J., 2011: LIBSVM: A Library for Support Vector Machines. – *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)* **2** (3).
- CHI, M., FENG, R. & BRUZZONE, L., 2008: Classification of Hyperspectral Remote-sensing Data with Primal SVM for Small-sized Training Dataset Problem. – *Advances in Space Research* **41** (11): 1793–1799.
- CONGALTON, R.G., FENSTERMAKER, L.K., JENSEN, J.R., MCGWIRE, K. & TINNEY, L.R., 1991: Remote Sensing And Geographic Information System Data Integration: Error Sources And Research Issues. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **57** (6): 677–687.
- FREUND, Y. & SCHAPIRE, R., 1999: A Short Introduction to Boosting. – *Journal of the Japanese Society for Artificial Intelligence* **14** (54): 771–780.
- FRICK, A., STEFFENHAGEN, P., ZERBE, S., TIMMERMANN, T. & SCHULZ, K., 2011: Monitoring of the Vegetation Composition in Rewetted Peatland with Iterative Decision Tree Classification of Satellite Imagery. – *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **2011** (3): 109–122.
- GUO, B., GUNN, S.R., DAMPER, R.I. & NELSON, J.D.B., 2006: Band Selection For Hyperspectral Image Classification Using Mutual Information. – *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **3** (4): 522–526.
- GUYON, I. & ELISSEE, A., 2003: An introduction to variable and feature selection. – *Journal of Machine Learning Resources* **3** (2003): 1157–1182.
- HSU, C.W. & LIN, C.J., 2002: A Comparison of Methods for Multi-class Support Vector Machines. – *IEEE Transactions on Neural Networks* **13** (2002): 415–425.
- HUGHES, G.F., 1968: On the Mean Accuracy of Statistical Pattern Recognition. – *IEEE Transactions on Information Theory (IT)* **14**: 55–63.
- KUNCHEVA, L.I. & WHITAKER, C.J., 2003: Measures of Diversity in Classifier Ensembles and Their Relationship with the Ensemble Accuracy. – *Machine Learning* **51** (2): 181–207.
- LANDGREBE, D.A., 2003: *Signal Theory Methods in Multispectral Remote Sensing*. – Wiley-Interscience, New York, NY, USA.
- LI, J., BIOCAS-DIAS, J.M. & PLAZA, A., 2013: Spectral-Spatial Classification of Hyperspectral Data Using Loopy Belief Propagation and Active Learning. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **51** (2): 844–856.
- LI, S., WU, H., WAN, D. & ZHU, J., 2011: An Effective Feature Selection Method for Hyperspectral Image Classification Based On Genetic Algorithm and Support Vector Machine. – *Knowledge-Based Systems* **24** (1):40–48.
- LI, X., WANG, L. & SUNG, E., 2008: AdaBoost with SVM-based Component Classifiers. – *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **21** (5).
- LIAO, Y. & MOODY, J., 1999: Constructing Heterogeneous Committees Using Input Feature Grouping. – *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS) Conference*: 921–927, MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- MARTINEZ-USO, A., PLA, F., SOTOCA, J.M. & GARCIA-SEVILLA, P., 2007: Clustering Based Multispectral Band Selection Using Mutual Information. – *18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2006)*: 760–763, Hong Kong, China.
- MELGANI, F. & BRUZZONE, L., 2004: Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images With Support Vector Machines. – *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* **42** (8): 1778–1790.
- NAKARIYAKUL, S. & CASASANT, D.P., 2007: Adaptive Branch And Bound Algorithm For Selecting Optimal Features. – *Pattern Recognition Letters* **28** (12): 1415–1427.
- OPELT, A., FUSSENEGGER, M., PINZ, A. & AUER, P., 2006: Generic Object Recognition with Boosting. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **28** (3): 416–431.
- PAL, M. & MATHER, P.M., 2006: Some Issues in the Classification of DAIS Hyperspectral Data. – *International Journal of Remote Sensing* **27** (14): 2895–2916.
- PRASAD, S. & BRUCE, L.M., 2008: Decision Fusion with Confidence-Based Weight Assignment for Hyperspectral Target Recognition. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **46** (5): 1448–1456.
- RICHARDS, J., 2013: *Remote Sensing Digital Image Analysis*. – 5th ed., Springer-Verlag, Berlin.
- SAMADZADEGAN, F., HASANI, H. & SCHENK, T., 2012: Simultaneous Feature Selection and SVM Parameter Determination in Classification of Hyperspectral Imagery Using Ant Colony Optimization. – *Canadian Journal of Remote Sensing* **38** (2): 139–156.
- SCHAPIRE, R.E. & SINGER, Y., 1998: Improved Boosting Algorithms Using Confidence-rated Predictions. – *Eleventh annual conference on Computational learning theory, COLT' 98*, to appear in *Machine Learning*: 80–91, New York, NY, USA.
- SCHÖLKOPF, B. & SMOLA, A.J., 2001: *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regulariza-*

- tion, Optimization, and Beyond. – MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- TARABALKA, Y., FAUVEL, M., CHANUSSOT, J. & BENEDIKTSSON, J., 2010: SVM- and MRF-Based Method for Accurate Classification of Hyperspectral Images. – *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **7** (4): 736–740.
- VALENTINI, G. & DIETTERICH, T.G., 2004: Bias-Variance Analysis of Support Vector Machines for the Development of SVM-Based Ensemble Methods. – *The Journal of Machine Learning Research* **5** (12): 725–775.
- VAPNIK, V.N. & VAPNIK, V., 1998: *Statistical Learning Theory*. – Wiley, New York, NY, USA.
- VILLA, A., BENEDIKTSSON, J.A., CHANUSSOT, J. & JUTTEN, C., 2011: Hyperspectral Image Classification With Independent Component Discriminant Analysis. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **49** (12): 4865–4876.
- VIOLA, P. & JONES, M., 2001: Fast and Robust Classification Using Asymmetric AdaBoost and a Detector Cascade. – *Advances in Neural Information Processing System* **14**.
- WANG, S.J., MATHEW, A., CHEN, Y., XI, L.F., MA, L. & LEE, J., 2009: Empirical Analysis of Support Vector Machine Ensemble Classifiers. – *Expert Systems Applications* **36** (3): 6466–6476.
- WASKE, B., LINDEN, S.V.D., BENEDIKTSSON, J.A., RABE, A. & HOSTERT, P., 2010: Sensitivity of Support Vector Machines to Random Feature Selection in Classification of Hyperspectral Data. – *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing* **48** (10): 2880–2889.
- WATANACHATURAPORN, P. & ARORA, M.K., 2004: Support Vector Machines for Classification of Multi- and Hyperspectral Data. – VARSHNEY, P.K. & ARORA, M.K. (eds.): *Advanced Image Processing Techniques for Remotely Sensed Hyperspectral Data*: 237–255, Springer-Verlag, Berlin.
- WICKRAMARATNA, J., HOLDEN, S.B. & BUXTON, B.F., 2001: Performance Degradation in Boosting. – *Multiple Classifier Systems: Second International Workshop, MCS 2001*: 11–21, Cambridge, UK.
- XIE, H., HEIPKE, C., LOHMANN, P., SOERGEL, U., TONG, X. & SHI, W., 2011: A New Binary Encoding Algorithm for the Simultaneous Region-based Classification of Hyperspectral Data and Digital Surface Models. – *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **2011** (1): 17–33.
- ZHAO, Y., ZHANG, L. & KONG, S.G., 2011: Band Subset Based Clustering and Fusion for Hyperspectral Imagery Classification. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **49** (2): 747–756.

Addresses of the Authors:

POURIA RAMZEI & Prof. Dr. FARHAD SAMADZADegan, University of Tehran, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Engineering, North Amirabad, Tehran, Iran, Fax +98-21-88008841, e-mail: {pramzi}{samadz}@ut.ac.ir

Prof. Dr.-Ing. PETER REINARTZ, German Aerospace Centre (DLR), Department of Photogrammetry and Image Analysis, Remote Sensing Technology Institute, D-82234 Oberpfaffenhofen, Germany, Tel. +49-8153-28-2757, e-mail: peter.reinartz@dlr.de

Manuskript eingereicht: August 2013
Angenommen: November 2013



Modification of High Resolution Airborne Laser Scanning DTMs for Drainage Network Delineation

MICHAEL VETTER & GOTTFRIED MANDLBURGER, Vienna, Austria

Keywords: Hydrology, flow accumulation, open source, GRASS-GIS, anthropogenic effects, street networks, DTM, ALS

Summary: In this paper a method is presented to adapt a 1 m ALS (Airborne Laser Scanning) DTM (Digital Terrain Model) for drainage network delineation. In such DTMs small natural topographic features as well as anthropogenic structures like roads and artificial embankments are contained, both influencing the drainage network delineation process in different ways. While natural topographic features lead water to drainage systems, anthropogenic structures can deflect water alongside artificial surfaces, which are not flow-active under regular hydrological conditions and, therefore, result in wrong drainage systems. We present a workflow to subtract the influence of roads in the DTM, replacing the actual road profile by an average hill slope of the neighbouring terrain. This modified DTM is the basis for drainage network delineation using standard flow accumulation. The drainage networks are derived for four DTM variants (1 m DTM, 1 m modified DTM, 5 m DTM and 5 m modified DTM) and the results are compared to a reference dataset. It is shown that the accuracy of the derived drainage network can be increased by 3–5% using the modified instead of the original 1 m DTM. The gain in accuracy amounts up to 12% when using the modified 1 m DTM compared to any of the 5 m DTM. Therefore, our conclusion is that high resolution and modified 1 m DTMs with anthropogenic structures such as roads strictly removed should be used for drainage network delineation instead of a coarse spatial resolution or an original 1 m DTM.

Zusammenfassung: *Anpassung eines hochauflösenden Airborne Laser Scanning DTMs zur Berechnung von hydrologischen Modellen.* In diesem Artikel wird eine Methode vorgestellt, mit der ein hochauflösendes 1 m ALS (Airborne Laser Scanning) DTM (Digital Terrain Model) für die Ableitung eines potentiellen Gerinnenetzes aufbereitet wird. In 1 m Geländemodellen sind natürliche Geländeemerkmale sowie Bereiche mit anthropogener Reliefüberformung (Straßen und künstliche Böschungen) abgebildet. Der natürliche Geländeverlauf und die anthropogenen Strukturen beeinflussen die Ableitung von Gerinnenetzwerken basierend auf Fließakkumulation unterschiedlich. So werden Gerinnenetze entlang des natürlichen Geländeverlaufs in der Regel ein realistisches Gerinnenetzwerk ergeben. Entlang von künstlichen Strukturen können die Berechnungen in eine Richtung abgelenkt werden, in welche unter normalen hydrologischen Bedingungen kein Abfluss stattfindet. Eine solche Ablenkung resultiert daher in einem unrealistischen Gerinnenetzwerk. Mit dem vorgestellten Ansatz, bei dem der Einfluss der Straßen aus dem Geländemodell herausgerechnet und durch eine angenäherte natürliche Neigung entlang der Straßen ersetzt wird, ist eine deutliche Verbesserung der Gerinneableitung möglich. Für vier verschiedene DTM-Varianten werden Gerinnenetze abgeleitet (1 m DTM, modifiziertes 1 m DTM, geglättetes 5 m DTM und modifiziertes 5 m DTM). Die Ergebnisse werden mit einem Referenzdatensatz verglichen, um die Genauigkeit der Ableitung zu dokumentieren. Die endgültigen Resultate der Ableitung und der Qualitätskontrolle ergeben eine Verbesserung der Genauigkeit um 3–5% des modifizierten im Vergleich zum originalen 1 m DTM und eine Verbesserung von bis zu 12% des modifizierten 1 m DTM im Vergleich zum geglätteten bzw. modifizierten 5 m DTM. Folglich ist unsere Empfehlung, für die Ableitung von Gerinnenetzwerken anstatt eines geglätteten 5 m DTM oder eines originalen 1 m DTM ein modifiziertes 1 m DTM zu verwenden, bei dem anthropogene Strukturen wie Straßen rigoros entfernt wurden.

1 Introduction

For the last two decades, Airborne Laser Scanning (ALS) has become the prime acquisition technique for collecting topographic data in high spatial resolution (> 1 point/m²) with a height accuracy of less than 15 cm (WEHR & LOHR 1999, BALTSAVIAS 1999), which is used in many different fields of application, e.g. HÖFLE & RUTZINGER (2011), MANDLBURGER et al. (2009), and SOFIA et al. (2011). While country-wide ALS data acquisition is already finished in some European countries, e.g. The Netherlands, Denmark, and Switzerland, some other countries will complete ALS data acquisition in the near future, e.g. Austria and Finland. Almost all European countries maintain river network data derived from low resolution Digital Terrain Models (DTMs) or topographic maps. This is also true for Austria, but the planimetric accuracy and the completeness of the Austrian river network are poor, especially for small catchments. The European Water Framework Directive (WFD, EU 2000) obligates the member countries to provide detailed, up-to-date river network data in high planimetric accuracy with additional attributes per river reach, e.g. length, bed slope, width, and stream ordering. Currently, activities are undertaken to standardize the data exchange on a transnational level. Guidelines for basic datasets have already been implemented (INSPIRE, EU 2007).

The standard drainage delineation methods implemented in proper GIS-Software are based either on single-neighbour flow algorithms (D8, O'CALLAGHAN & MARK 1984) or multiple-neighbour flow algorithms like multiple flow direction (MFD, QUINN et al. 1991). Both flow algorithms are used to compute drainage networks which indicate the potential watercourses. A comprehensive overview about flow algorithms and their differences are given by GRUBER & PECKHAM (2009) and WILSON et al. (2008). Various implementations are available in standard GIS software providing specialized tools for individual environments. Besides flow algorithms, other methods exist to derive drainage networks and features related to hydrology (PASSALACQUA et al. 2010, 2012).

The differences between drainage network delineation based on high spatial resolution and coarse DTMs are shown in LI & WONG (2010). The quality of a drainage network based on high spatial resolution data, e.g. a 1 m DTM grid, is mainly influenced by man-made objects such as streets and dams, where the flow direction is deflected along the gradient of the street. Remaining bridges or missing objects like culverts or pipes acting as flow barriers, which are not represented in the DTM and yield unrealistic flow paths (VIANELLO et al. 2009). A DTM free of the above mentioned flow barriers, which additionally guarantees a monotone height progressing along the streams, is referred to as a "hydrologically enforced DTM". Such a DTM is a prerequisite for obtaining correct drainage network results.

2 Objectives

We present a study to map the potential river drainage network system using a high resolution ALS DTM in order to increase the level of detail, correctness and completeness of the final drainage system. Due to the fact that streets produce massive errors for drainage network delineation (VIANELLO et al. 2009) it is our aim to show the positive impact of manipulating artificial structures in a high spatial resolution ALS DTM on the delineation quality. The goal of this contribution is the derivation of potential river drainage systems. Hereby, the term "potential river" describes the watercourse following the terrain gradient under regular hydrological conditions. At locations where streets block the potential flow path, pipes and culverts are usually built to guarantee a continuous watercourse along ditches. Those pipes and culverts are dimensioned to cope with regular run-off volumes. As regular hydrological conditions are presumed in this article, no deflections alongside the streets are expected. As subsurface man-made structures under roads, e.g. pipes, are undetectable in ALS data, the roads act as walls or barriers if they are not removed from the ALS DTM prior to the drainage delineation. As 1 m DTMs are available in many countries, the goal is to exploit the full potential of those data as source

for drainage network delineation, which is not the case up to now (MANDLBÜRGER et al. 2011). Therefore, we present a method to modify a DTM by section-wise recalculating the near-natural slope before the road was constructed and by replacing the actual road profile based on the average hill slope. This yields a modified 1 m DTM without streets. The results are compared to a reference dataset provided by the local mapping authority. We assume that the modification of the DTM leads to a better drainage network mapping accuracy when applying automatic delineation based on flow accumulation.

3 Test Site and Data

The chosen test site is a sub-catchment of the Bregenzer Ach (Vorarlberg, Austria) draining the Bregenzerwald. The Bregenzer Ach is an alpine river with an approximate length of 80 km, a total catchment area of 830 km², an average annual discharge of 46 m³/s and a maximum discharge of 1350 m³/s, which was measured in August 2005, as a 100 year flood event (AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG 2005). The selected sub-catchment

covers an area of 93 km² and is divided into an upper (Bolgenach) and a lower (Weißache) sub-catchment (Fig. 1). The terrain elevations range from 450 m at the confluence of the Weißach and the Bregenzer Ach to 1645 m at the Feuerstätterkopf. The dominant geological formation is Molasse with a dense drainage system (OBERHAUSER & RATAJ 1998).

For the test site ALS data are available from different epochs. For this study the DTM derived from the point cloud, using the hierarchic robust filtering approach described by KRAUS & PFEIFER (1998), of the November 2003 campaign, was chosen. The average point density is 1.6 points/m² (last echoes). The data were collected with Optech's ALTM 2050 scanner in discrete echo recording with a maximum of four reflections per laser shot. The grid width of the DTM is 1 m. In addition, a resampled version of the DTM with a spatial resolution of 5 m was generated.

Besides the topographic data, a street and a drainage network layer were provided by the local mapping authority (Landesamt für Vermessung und Geoinformation, LVG). The street layer contained several files, each of them representing different street/road types such as high order streets, municipal roads,

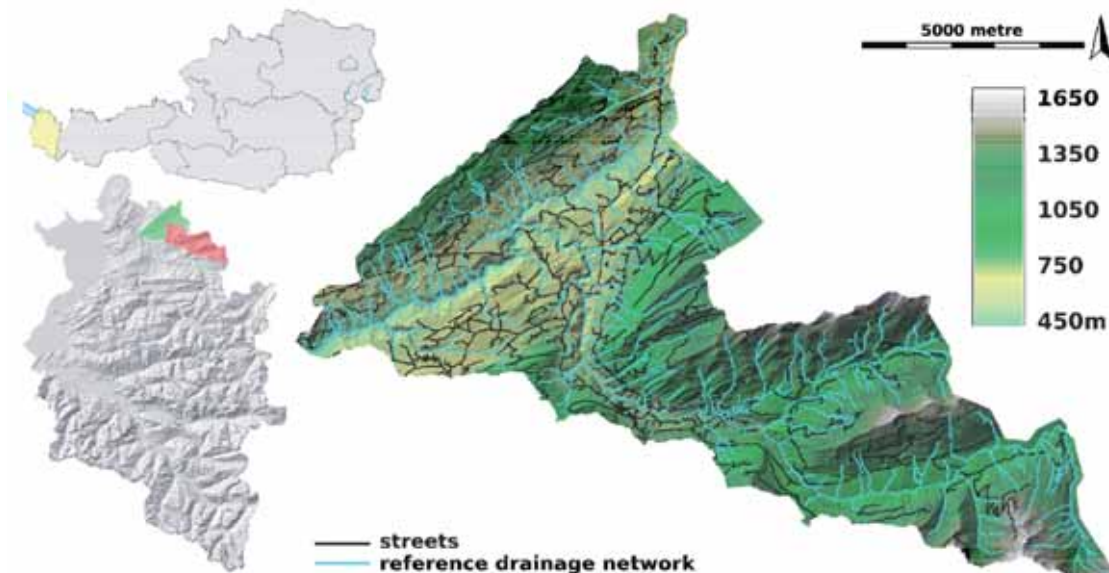


Fig. 1: Test site (Bregenzerwald, Vorarlberg, Austria); shading superimposed with elevation coding, roads and existing river network. Left: map of Vorarlberg with the upper (red) and lower (green) sub-catchments of the Bregenzer Ach. Map sources: Austria: Wikimedia.org as svg; Vorarlberg: <http://vogis.cnv.at/> (WMS); catchments, streets and official drainage network: Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG, Amt der Vorarlberger Landesregierung).

forest roads or hiking trails. The layers were produced by different departments within the authority of Vorarlberg on the basis of orthophotos and shaded relief maps of the 1 m DTM. Before the actual processing, a consistency check was performed by visual inspection and the different layers were merged into a single dataset. It could be verified that the deviation of the street locations compared to the shaded relief map of the 1 m ALS DTM is less than 5 m.

The reference drainage network dataset was provided by the local hydrology and geoinformation department (Abteilung Wasserwirtschaft, Landesamt für Vermessung und Geoinformation). It was mapped in a semi-automatic way by deriving the main drainage network using standard flow accumulation methods based on the 1 m ALS DTM from 2003. The resulting vector dataset was interactively edited using orthophotos and 1 m shaded relief maps to improve the correctness and completeness of the dataset. This reference dataset also includes all culverts, piped sections under bridges and fictitious river axes through lakes. The provided reference drainage network is constantly improved and entirely supervised by hydrology experts and is the best available dataset covering the entire area of one single federal state in Austria. The latest timestamp of the river network reference data is October 10, 2012. Those data are used for evaluating the presented methods. Although there is a time difference between the ALS DTM and the reference dataset, this time gap is of minor importance, because no streets

have been built and no major mass movements or other natural hazards have occurred since the time the ALS data were acquired in 2003. Only in one part a huge landslide is currently active but in this area no streets are located.

4 Methods

The method relies on two datasets. The first dataset is the ALS DTM, which is used as basic input for the processing workflow presented later, and for drainage network delineation. The second dataset is a vector (polyline) layer representing the axes of the existing streets. Wherever possible, street data from the local mapping authorities should be used, because these datasets are usually well maintained in Europe concerning both, accuracy and up-to-dateness. If no such official data source is available, street layers can also be extracted from OpenStreetMap (OSM) or obtained from commercial navigation and routing system providers with an expected lower accuracy. If no centre lines of the streets are available, the street edges can be derived by using a multi-scale segmentation approach (BAATZ et al. 2003), raster-based classification using elevation, slope, aspect and curvature (first and second order derivatives) as shown in WOOD (1996), BRÜGELMANN (2000) or RUTZINGER et al. (2011) or breakline modelling based on the ALS point cloud, e.g. BRIESE (2004). The resulting street edges can be used to obtain the centre lines.

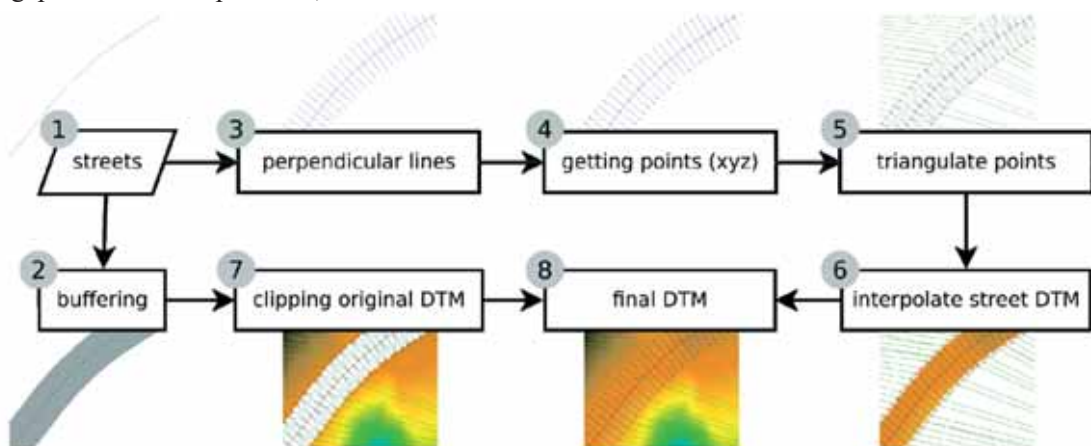


Fig. 2: Workflow and processing chain for DTM modification.

Our workflow is shown in Fig. 2. First, the centre lines of the streets (1) are buffered to define the extent for DTM modification (2). Then, perpendicular lines (cross sections) with a fixed distance from each other along the street axis and a predefined length are created (3). For each cross section the heights of the start and end points are interpolated from the DTM and the height of the centre point is calculated by linear interpolation from the start and end points, resulting in three X,Y,Z coordinate triples (4) for each cross section. After that, all extracted start, centre, and end points of a single street line are triangulated (5) and from the resulting TIN a regular grid of the buffer area (6) is derived, representing the reconstructed model of the terrain with near-natural slope. Finally, the buffer from step (2) is used to clip the DTM (7) and, by a map algebra operation, the clipped DTM and the reconstructed surface along the street are fused to the modified DTM (8), containing no streets.

5 Experiments

The method described in the previous section was applied to the original 1 m DTM described above, yielding a modified DTM of 1 m resolution. To simulate the influence of a coarser resolution on the final drainage network product, both the original and the modified 1 m DTM were down-sampled to a spatial resolution of 5 m by applying a moving av-

erage filter. As a consequence, four different DTMs are used in our experiments (original 1 m DTM, modified 1 m DTM, 5 m DTM, and modified 5 m DTM).

For drainage network delineation, a standard flow accumulation method based on Multiple Flow Directions (MFD), as implemented in GRASS-GIS (`r.stream.extract`, JASIEWICZ & METZ 2011, GRASS DEVELOPMENT TEAM 2012), is used to compute the drainage network.

For the error assessment a line based approach as described in RUTZINGER et al. (2012) is chosen. For each dataset, i.e. reference and the derived drainage network, we interpolate points along the lines at a regular interval, and we replace the lines by these (dense) point sets. The evaluation procedure is based on an analysis of the reference and the derived drainage point sets. Points from both datasets are accepted as corresponding (True Positives, TP) if they are within a defined search radius (Fig. 3). False Positives (FP) denote points of the derived dataset for which no corresponding point in the reference exists. Points of the reference with no corresponding point in the derived dataset are counted as False Negatives (FN). Correctness (1), completeness (2) and quality (3) are calculated for selected search radii (1 m, 5 m, 10 m, and 15 m), taking into account the numbers of TP, FP and FN, respectively.

$$\text{Correctness} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$\text{Completeness} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$\text{Quality} = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (3)$$

6 Results

In this section we present the results of data processing (DTM modification) as well as the comparison of the different drainage networks obtained by using the four DTM variants described in section 5. The comparison is carried out both, by visual inspection of the derived drainage networks and by a statistical analysis of the accuracy with respect to the reference data.

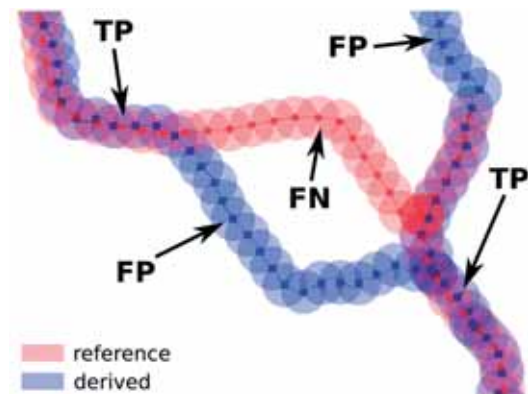


Fig. 3: Classification of the nodes of the derived and reference network into True Positives (TP), False Positives (FP) and False Negatives (FN); schematic diagram.

6.1 DTM Modification

The parameters required for the DTM modification are a) the buffering distance, b) the cross section distance along the street axis, and c) the length of the cross sections. The buffering distance a) is strongly related to the cross section length c), because the length c) has to be larger than the buffering distance to guarantee that no void data areas are produced during data fusion, e.g. Fig. 2, step 8. The cross section distance b) controls the granularity of the interpolated slopes and therefore should be kept small. The parameters used in our experiments are a): 7 m buffering distance, resulting in a buffer width of 14 m, which corresponds to the width of a street having four lanes; b): 3 m profile distance along the road axes; c): 16 m length of the profiles. During the workflow (Fig. 2, step 4) the X,Y,Z coordinates of the start, centre and end points of the cross sections are triangulated.

Fig. 4 shows the colour coded height differences between the original and the modified 1 m DTM for a short street section. Plots of three cross sections (A, B, C) illustrate the ef-

fect of the DTM modification. In the plots the original DTM is shown in blue and the modified profile in red. The modified surface represents the natural slope before road construction. The interpolation is carried out for all streets and roads of the provided street layer, which results in a modified DTM approximating the original slope. This modified DTM is the basis for the further calculations of the drainage network. The modified 5 m DTM is calculated by resampling the modified 1 m DTM.

6.2 Drainage Derivation

As a precondition for the subsequent derivation of the drainage network the Multiple Flow Direction was calculated for all four DTMs.

The parameters for drainage network delineation are I) minimum catchment area (2.5 ha) and II) minimum segment length (> 100 m). These parameter values are applied to all DTMs to produce comparable results. A discussion about different drainage delineation parameters is not given in this article, because

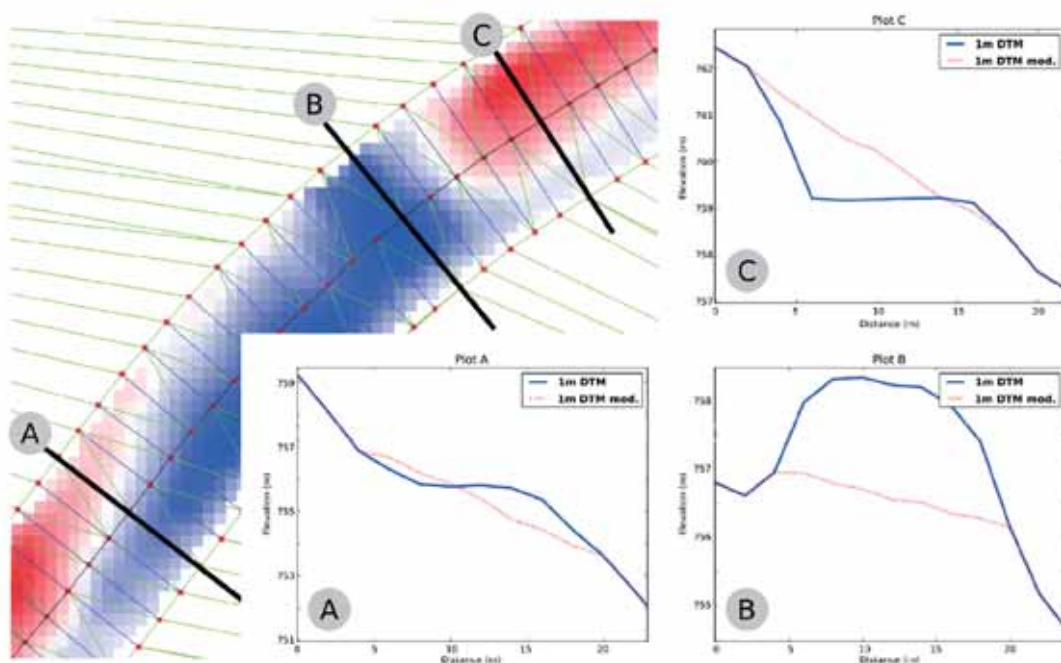


Fig. 4: Difference between original and modified 1 m DTM with street centre line (black), cross sections (blue), interpolation points (red) and triangulation (green); sections through original and modified DTM (DTM blue solid line, modified DTM red dashed line).

this is discussed in numerous papers, e.g. WILSON et al. (2008). Our focus is on presenting the advantages of using a modified 1 m DTM for deriving drainage systems, not on optimizing parameters for drainage delineation.

The drainage networks based on the four different DTM variants are shown in Fig. 5. It is clearly visible that the original 1 m DTM results in many drainage segments alongside the streets (Fig. 5a). A drainage segment is a part of the stream network between two nodes (nodes are intersection points, confluence points, source or end points). These problems are reduced but not completely removed by using a resampled 5 m DTM (Fig. 5b). Using the proposed DTM modification, the artificial flow patterns alongside the streets are more effectively removed, and at the same time a high level of detail is preserved (Fig. 5c). The use of a modified 5 m DTM (Fig. 5d) shows no deflection at all along the roads.

Fig. 5 also reveals that the deflection of delineated drainage segments is higher for the

original 1 m and the 5 m DTMs than for both modified models. By resampling the DTM, small but sometimes relevant terrain features are removed. If an important terrain feature is removed, the direction of the drainage can be changed dramatically and can result in a wrong final network. This phenomenon can be seen in Figs. 5b and 6a alike. The level of detail of the derived drainage network also decreases if a 5 m DTM is used. On the one hand, the lengths of the source segments decrease and on the other hand, the spatial resolution and, therefore, the stream mapping accuracy also decreases.

6.3 Accuracy of the Derived Drainage Network

In this section we present the accuracy of the derived drainage network with respect to the reference data. For the quantitative assessment all piped and fictitious river segments (7.5% of

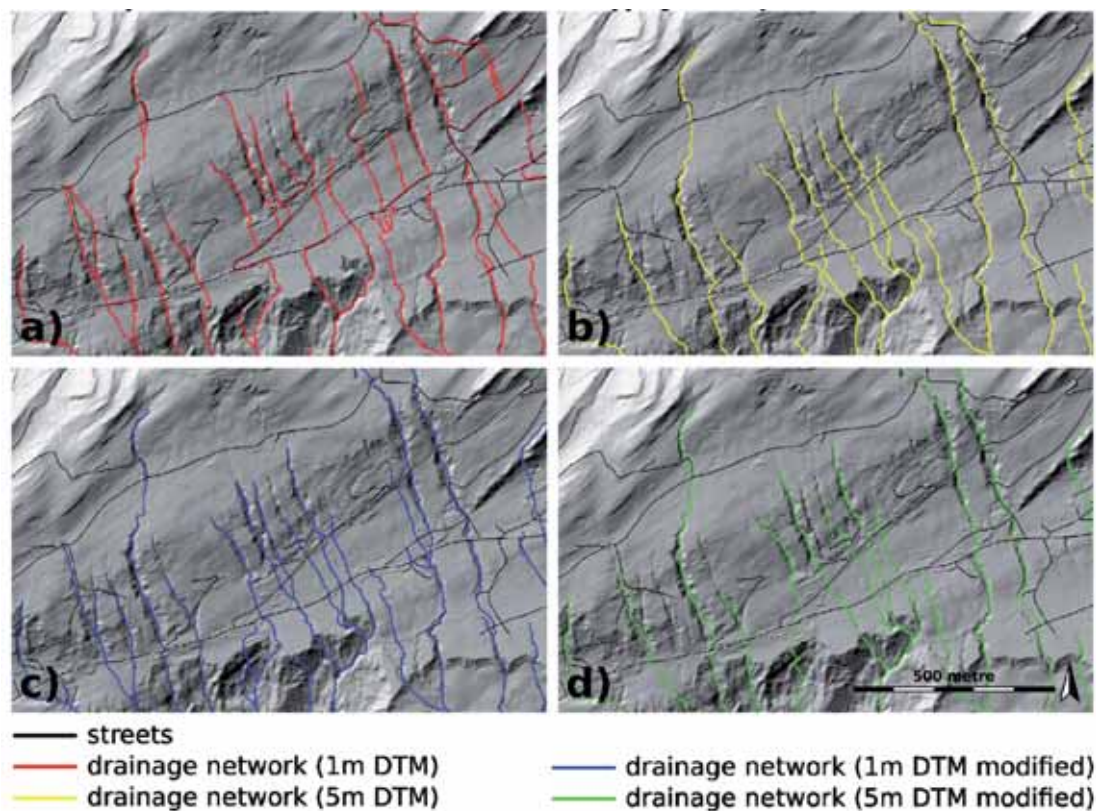


Fig. 5: Drainage network based on original and modified DTMs (1 m, 5 m). a) 1 m DTM; b) resampled 5 m DTM; c) modified 1 m DTM; d) modified 5 m DTM.

the original reference data) have been excluded from the reference network. As can be seen in Fig. 6a, the test site contains piped sections, mainly alongside roads, and, consequently, the reference dataset does show some flow paths following the course of the road. In these specific cases the piped sections are measures to prevent mass movements. Usually, piped sections are built as shortest possible conduit across the road to allow water flow under the road. Our approach is designed to deal with that normal kind of underpass conductor but not with piped sections along the road. Therefore, this particular part of the reference data was neglected for the quantitative evaluation.

A visual comparison of the derived drainage system of both modified DTMs (1 m and 5 m) and the reference is presented in Fig. 6a. The correspondence of the derived drainage network based on the modified 1 m DTM is satisfactory. A few locations at the stream head are generally missing in the reference network, where the stream head is close to the catchment boundary. This results from the used catchment area threshold for drainage network delineation. It can be stated that the additional flow length in upstream direction provided by the automatic delineation process is useful information although it is not covered in the reference. As can be seen in Figs. 6a and 6b, the drainage network derived from the modified 1 m DTM delivers more streams than are contained in the reference network. The fact that these extra streams are contained in the derived dataset means that they are well pronounced in the DTM. But this does not necessarily mean, that they are permanently drained, for which reason the expert responsible for the reference dataset may have disregarded them as relevant rivers. At least, in case of major precipitation events, these streams are likely to contribute to the surface runoff.

The cumulative lengths of the reference data and the derived drainage networks are analysed in Tab. 1. The derived network based on the original and the modified 1 m DTM is more than twice as long as the reference (Fig. 6) and the drainage based on both 5 m models are approximately 1.4 times longer than the reference. A small part of the differences in lengths stems from the zig-zag pat-

terns in the derived data caused by rasterisation. However, most of the differences are due to a higher number of drainage segments in the derived datasets and their extended length compared to the reference.

For the quantitative error assessment, a point spacing of 1 m is used for all drainage networks and the reference data. The percentages of completeness, correctness and the quality are shown in Tab. 2.

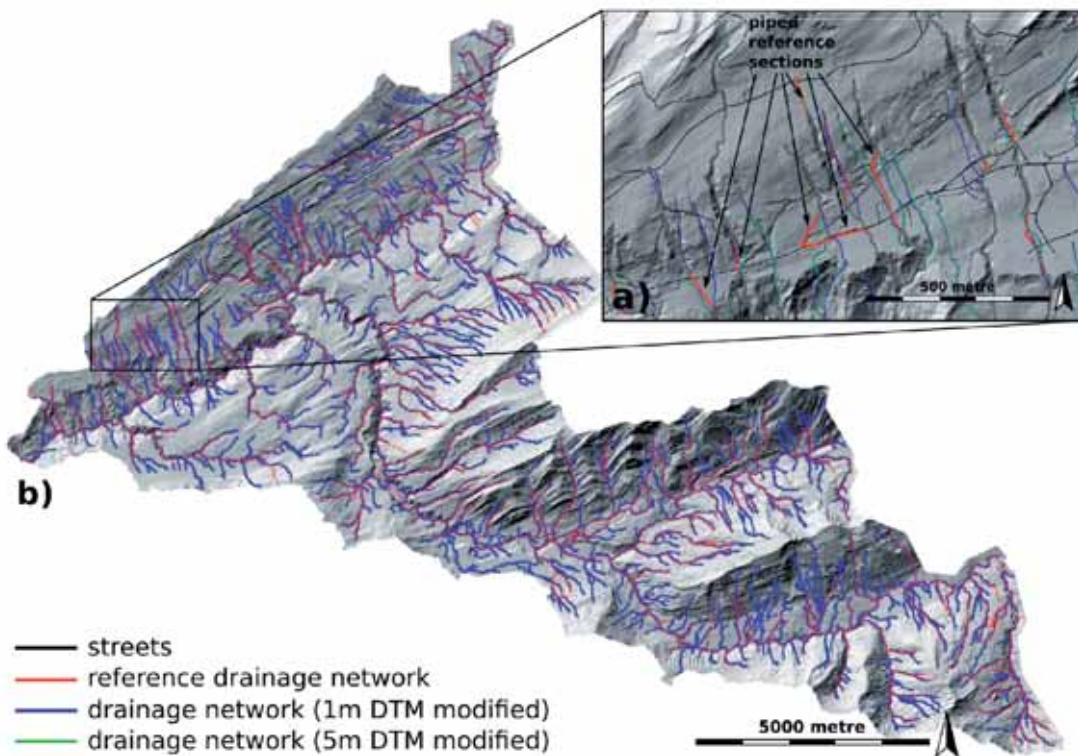
7 Discussion

The presented method for DTM modification, using existing street data to replace and remodel near-natural slopes along the roads, uses a global constant street buffer width. A global width was chosen as the GIS metadata of the roads does not entirely contain road classification information. It is assumed that buffering taking into account different street widths could increase the quality of the DTM modification process. As shown in Tab. 2, the completeness of the derived river network is much better than the correctness for all considered DTM variants when taking into account all derived stream segments, i.e., all drainage sections between two nodes, section 6.2. The completeness is almost the same for both 1 m models, but there is a difference of up to 17% between the 1 m and the 5 m DTMs. On the other hand, the correctness and the quality are much better for the 5 m models. The lower correctness of both 1 m DTMs basically stems from the higher number of automatically derived streams and their extended length, both, with respect to the 5 m DTMs and the reference. The added value of these extra streams was already discussed in section 6.

Tab. 2 clearly shows a moderate and unsatisfactory quality. However, this global comparison using the entire automatically derived network is unjustified as rivers of minor importance for the countrywide river network were deliberately ignored by the human operator providing the reference network. To improve the comparability, three subsets of the derived network were compiled and analyzed independently with respect to completeness, correctness and quality. The subsets are

Tab. 1: Cumulative length of networks entire reference data, revised reference data (fictitious and piped sections removed) and derived networks based on original and modified DTM (1 m & 5 m).

Data	Reference	Reference subset	1 m DTM	1 m DTM modified	5 m DTM	5 m DTM modified
Length (m)	246,163	227,688	518,250	495,106	353,501	346,980
Percentage	100.0	92.5	210.5	201.1	143.6	141.0

**Fig. 6:** Results of drainage network delineation. a) From modified 5 m DTM (green), modified 1 m DTM (dark blue) and the reference network (red); b) Drainage network of the entire test site derived from modified 1 m DTM and reference data. Piped reference sections are marked.**Tab. 2:** Error assessment (completeness, correctness and quality); complete drainage network compared with revised reference data.

	1 m radius			5 m radius			10 m radius			15 m radius		
	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality
All segments												
DTM 1 m	0.50	0.21	0.17	0.85	0.35	0.33	0.90	0.37	0.35	0.92	0.38	0.36
DTM 1 m modified	0.50	0.22	0.18	0.86	0.37	0.35	0.91	0.39	0.38	0.92	0.40	0.39
DTM 5 m	0.33	0.20	0.14	0.78	0.47	0.42	0.83	0.50	0.46	0.85	0.51	0.47
DTM 5 m modified	0.33	0.20	0.14	0.79	0.48	0.43	0.84	0.51	0.47	0.86	0.53	0.48

introduced step by step with the final goal to restrict the nominal-actual comparison to the vindicated parts.

First, all extra segments of the derived dataset located entirely outside a 20 m perimeter around the reference network were excluded (Selection I, blue lines in Fig. 7a). Additionally, all major rivers featuring a width larger than 20 m, i.e. the Weißache and the Bolgenache, were removed (selection II, cf. blue lines in Fig. 7b). Finally, based on Selection II the detailed area shown in Fig. 6a was analysed separately (Selection III). Hereby, the

reference data segments were compared to the spatially correlating parts of the derived segments, i.e. the derived segments were cut to the same lengths as the reference. In this way, all parts of the derived segments (i) corresponding to piped sections of the reference or (ii) extending the reference near the source were removed (blue lines in Fig. 7c spatially corresponding to the red lines in Fig. 7d).

Tab. 3 shows that the completeness is higher for the derived drainage network using the modified 1 m DTM than for the drainage derived based on the original 1 m or both 5 m

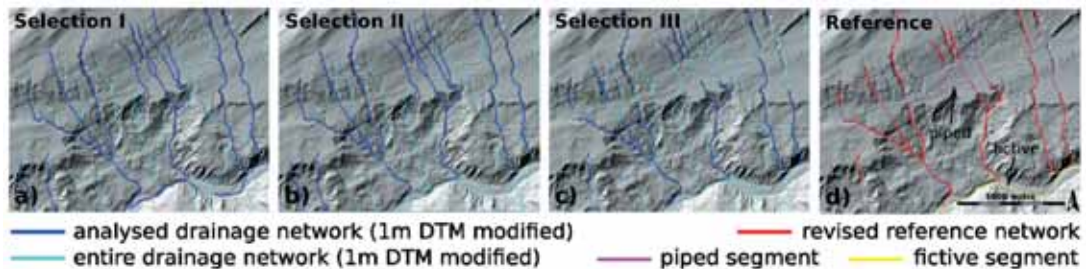


Fig. 7: Subsets of the river network derived from modified 1 m DTM (a-c, blue lines corresponding to Selection I-III) and reference data (d, red lines).

Tab. 3: Error assessment (completeness, correctness and quality) for Selection I, II and III (Fig. 7).

	1 m radius			5 m radius			10 m radius			15 m radius		
	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality
Selection I												
DTM 1 m	0.49	0.36	0.26	0.83	0.61	0.54	0.88	0.65	0.60	0.90	0.66	0.62
DTM 1 m modified	0.49	0.38	0.27	0.85	0.65	0.58	0.90	0.68	0.63	0.91	0.70	0.65
DTM 5 m	0.32	0.27	0.17	0.77	0.65	0.54	0.82	0.69	0.60	0.84	0.71	0.62
DTM 5 m modified	0.33	0.27	0.17	0.78	0.65	0.55	0.84	0.69	0.61	0.86	0.71	0.64
	1 m radius			5 m radius			10 m radius			15 m radius		
Selection II	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality
DTM 1 m	0.54	0.40	0.30	0.85	0.63	0.57	0.80	0.65	0.59	0.89	0.66	0.61
DTM 1 m modified	0.55	0.42	0.31	0.87	0.67	0.61	0.89	0.69	0.64	0.90	0.70	0.65
DTM 5 m	0.34	0.29	0.19	0.77	0.66	0.55	0.80	0.68	0.58	0.81	0.69	0.60
DTM 5 m modified	0.35	0.29	0.19	0.79	0.65	0.56	0.82	0.68	0.59	0.84	0.69	0.61
	1 m radius			5 m radius			10 m radius			15 m radius		
Selection III	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality	comp.	corr.	quality
DTM 1 m modified	0.63	0.55	0.41	0.97	0.84	0.83	0.99	0.86	0.85	0.99	0.86	0.86

DTMs. The correctness is higher for the modified 1 m DTM compared to the other DTMs within the 1 m search radius (Tab. 2). If the main river is included (Tab. 2 and Tab. 3, selection I) in the evaluation, the correctness of the streams based on the coarse resolution DTMs is higher. In Tab. 3, both, correctness and completeness are higher for the 1 m modified DTM streams. The correctness (in Tab. 2) is much lower than the completeness, because piped sections and fictive river axes through lakes and large rivers have deliberately been removed from the reference dataset as mentioned in section 6. Due to our DTM modification these parts are contained in the derived dataset, causing a high level of FP and, consequently, a low correctness. Furthermore, the automatic delineation algorithm produces more streams (Tab. 1) than are contained in the reference, which further contributes to the low correctness. This does not necessarily mean that the automatically derived network is incorrect, but a separation into parts where the derived network really deviates from the reference and extends the reference is necessary.

For that reason the quality assessment was carried out for Selection I, II and III. Selection I considers the fact that the automatic process delivers more streams and that rivers in sub-catchments are contained, where they have been disregarded in the reference. For the 5 m search radius, the increase in correctness is more than 25% for the original and modified 1 m DTMs (Tab. 2: 0.35/0.37 vs. Tab. 3/Selection I: 0.61/0.65). Selection II deals with rivers wider than 20 m, where the employed flow accumulation based delineation procedure is not the method of first choice. For streams of that size, the planimetric accuracy of the river axis based on flow accumulation is low as the derived line is meandering. For deriving accurate centre lines of such rivers more suitable approaches exist, e.g. HÖFLE et al. (2009) and VETTER et al. (2011). The additional increase is 2% for both 1 m DTMs. Selection III additionally takes into account that (i) underground piped sections are built more or less straight and not following the surficial discharge and (ii) that the derived source segments generally extend their counterpart in the reference network near the river head. This subset repre-

sents a commensurable basis of the reference and the derived dataset. Again, for the 5 m search radius the correctness of the modified 1 m DTM rises to 84%.

From Tab. 3 it can be seen that the correctness gradually increases from Selections I to III. Furthermore, an increase of the correctness is noticeable from 1 m search radius to 5 m, but larger search radii do not lead to a further improvement. From that observation we conclude that the planimetric accuracy of the derived network is in the metre range. Concerning the different DTM variants, it can be stated that whereas Tab. 2, i.e. all derived segments, exhibits higher correctness for the coarse resolution DTMs, the modified 1 m DTM strictly outperforms the other DTMs in Tab. 3. This is the reason why the evaluation for Selection III was only carried out for this DTM variant. The accuracy of the derived drainage network as measured by the completeness, the correctness and the quality of the results, is on average 3 to 5% higher when using the modified DTM rather than the original 1 m DTM. We consider a 3 to 5% increase in quality as a relevant improvement. It is crucial to mention that not all man-made structures necessarily have high impact on the natural run-off. In other words, in most cases the run-off is dominated by the overall natural relief. Thus, the improvement potential in terms of completeness, correctness and quality is within narrow bounds, but nonetheless the remaining 5% improvement may locally make a big difference. Comparing the results achieved for the modified 1 m DTM with those achieved using the DTM at a lower resolution; the average is between 1% and 12% better using the modified DTM. The main differences between the results based on DTMs of 1 m and 5 m resolution occur in the completeness and only minor differences occur in the correctness. By using coarse resolution input data, the possibility of deflecting the derived run-off is much more evident. Some terrain features are removed due to the resampling process. Therefore, the flow accumulation follows a wrong slope, e.g. drain to a neighbouring valley, Fig. 6a. As this increases the necessary manual editing effort, the proposed method facilitates the drainage network delineation process.

8 Conclusion

For the derivation of a river network based on standard flow accumulation techniques a hydrologically enforced DTM without barriers hindering the run-off is required. The available high resolution DTMs do not fulfil this prerequisite as they contain objects like bridges and street dams acting as flow barriers. In this contribution we therefore presented an approach to automatically modify the DTM within a buffer zone around streets. Dams, cuttings and bridges are removed and the near-natural slope before anthropogenic relief transformation is approximated.

The drainage networks derived from the original and modified 1 m DTM as well as for downsampled 5 m models were compared with reference data manually digitized by hydrology experts. It could be shown that the overall accuracy gain is 3–5% when using the modified instead of the original 1 m DTM and 12% compared to the down-sampled 5 m DTM. Whereas the down-sampling of the high resolution DTM speeds up the delineation process, this potentially results in incorrect deflections of the run-off. The availability of topographic details contained in the 1 m DTM are especially important near the catchment boundaries.

The presented DTM modification strategy is designed for regular discharge condition, i.e. mean-flow, where the upstream waters fully drain-off under the streets via piped sections. In our approach, the impact of these piped sections is simulated by the applied DTM modification. Beyond that, additional hydrologically relevant constructional measures exist, e.g., to stabilize slopes prone to landslides via piped sections alongside the slopes and/or streets. As these features are invisible in the DTM, they are generally not available for the flow accumulation based river network derivation. This results in deviations of the derived network from the reference and in a decreased accuracy in these areas. As a consequence, manual editing of the final streams by an expert becomes necessary whenever the data basis does not fulfil the requirements of a hydrologically enforced DTM. However, it can be concluded that the proposed method contributes to reduce the manual editing effort and,

therefore, increases, both, the reproducibility and the efficiency of the river network derivation process.

Acknowledgements

The authors want to thank the “Landesamt für Vermessung und Geoinformation” of Vorarlberg, Austria, namely to PETER DREXEL for providing the DTM as well as the reference dataset of the drainage network. Thanks also go to our colleagues BERNHARD HÖFLE of the University of Heidelberg, Germany, and MARTIN RUTZINGER from the University of Innsbruck for supporting the accuracy measure calculation. This study was co-funded by the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management (Project: BIMLFUW-UW.3.2.5/0040-VII/2010). We would also like to acknowledge the financial support from the Austrian Science Funds (FWF) as part of the Vienna Doctoral Programme on Water Resource Systems (DK-plus W1219-N22), the Austrian Science Promotion Agency (FFG-COMET) project “Alpine Airborne Hydromapping – from research to practice” (AAHM-R2P), the Austrian Climate and Energy Fund – ACRP Program – Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility (C3S-ISLS) and the Institute of Geography, University of Innsbruck.

References

- AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG, 2005: Das Starkregen- und Hochwasserereignis des August 2005 in Vorarlberg. – Amt der Vorarlberger Landesregierung, www.vorarlberg.at/pdf/naturereignisdokumentatio.pdf (10.11.2013).
- BAATZ, M., 2003: eCognition – user guide 3, Definiens Imaging GmbH.
- BALTSAVIAS, E.P., 1999: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **54** (2–3): 199–214.
- BRIESE, C., 2004: Three-dimensional Modelling of Break lines from Airborne Laser Scanner Data. – *IAPRS* **35** (B3): 1097–1102.
- BRÜGELMANN, R., 2000: Automatic breakline detection from airborne laser range data. – *IAPRS* **33** (B3): 109–116.

- EU, 2000: Water Framework Directive, 2000/60/EC. – Official Journal of the European Union (OJL) **327**: 173.
- EU, 2007: Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). – Directive 2007/2/EC, Official Journal of the European Union (OJL) **50**: 114.
- GRASS DEVELOPMENT TEAM, 2012: Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software. – Open Source Geospatial Foundation, <http://grass.osgeo.org> (1.12.2012).
- GRUBER, S. & PECKHAM, S., 2009: Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. – HENGL, T. & REUTER, H.I. (eds.): *Geomorphometry Concepts, Software, Applications*, 171–194, Elsevier, 2009.
- HÖFLE, B., VETTER, M., PFEIFER, N., MANDLBÜRGER, G. & STÖTTER, J., 2009: Water surface mapping from airborne laser scanning using signal amplitude and elevation data. – *Earth Surface Processes and Landforms* **34**: 1635–1649.
- HÖFLE, B. & RUTZINGER, M., 2011: Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. – *Zeitschrift für Geomorphologie/Annals of Geomorphology* **55**: 1–29.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **53**: 193–203.
- JASIEWICZ, J. & METZ, M., 2011: A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks. – *Computers and Geosciences* **37** (8): 1162–1173.
- LI, J. & WONG, D.W.S., 2010: Effects of DEM sources on hydrologic applications. – *Computers, Environment and Urban Systems* **34** (3): 251–261.
- MANDLBÜRGER, G., HAUER, C., HÖFLE, B., HABERSACK, H. & PFEIFER, N., 2009: Optimisation of LiDAR derived terrain models for river flow modelling. – *Hydrology and Earth System Sciences* **13**: 1453–1466.
- MANDLBÜRGER, G., VETTER, M., MILENKOVIC, M. & PFEIFER, N., 2011: Derivation of a countrywide river network based on Airborne Laser Scanning DEMs. – Results of a pilot study Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand: 2423–2429.
- O'CALLAGHAN, J.F. & MARK, D.M., 1984: The extraction of drainage networks from digital elevation data. – *Computer Vision, Graphics and Image Processing* **28**: 328–344.
- OBERHAUSER, R. & RATAJ, W., 1998: *Geologisch-Tektonische Übersichtskarte Vorarlberg 1:200.000*. Wien, Geologische Bundesanstalt.
- PASSALACQUA, P., TRUNG, T.-D., FOUFOULA-GEORGIOU, E., SAPIRO, G. & DIETRICH, W.E., 2010: A geometric framework for channel network extraction from lidar: nonlinear diffusion and geodesic paths. – *Journal of Geophysical Research – Earth Surface* **115**: F01002, doi:10.1029/2009JF001254.
- PASSALACQUA, P., BELMONT, P. & FOUFOULA-GEORGIOU, E., 2012: Automatic geomorphic feature extraction from lidar in flat and engineered landscapes. – *Water Resources Research* **48**: W03528; doi:10.1029/2011WR010958.
- QUINN, P.F., BEVEN, K.J., CHEVALLIER, P. & PLANCHON, O., 1991: The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. – *Hydrological Processes* **5**: 59–79.
- RUTZINGER, M., HÖFLE, B., VETTER, M. & PFEIFER, N., 2011: Digital terrain models from airborne laser scanning for the automatic extraction of natural and anthropogenic linear structures. – SMITH, M., PARON, P. & GRIFFITHS, J.S. (eds.): *Geomorphological Mapping: a professional handbook of techniques and applications*: 475–488, Elsevier.
- RUTZINGER, M., HÖFLE, B. & KRINGER, K., 2012: Accuracy of automatically extracted geomorphological breaklines from airborne LiDAR curvature images. – *Geographiska Annaler: Series A, Physical Geography* **94**: 33–42.
- SOFIA, G., TAROLLI, P., CAZORZI, F. & DALLA FONTANA, G., 2011: An objective approach for feature extraction: distribution analysis and statistical descriptors for scale choice and channel network identification. – *Hydrology and Earth System Sciences* **15** (5): 1387–1402.
- VETTER, M., HÖFLE, B., RUTZINGER, M. & MANDLBÜRGER, G., 2011: Estimating changes of riverine landscapes and riverbeds by using airborne LiDAR data and river cross-sections. – *Zeitschrift für Geomorphologie/Annals of Geomorphology* **55**: 51–65.
- VIANELLO, A., CAVALLI, M. & TAROLLI, P., 2009: LiDAR-derived slopes for headwater channel network analysis. – *CATENA* **76** (2): 97–106.
- WEHR, A. & LOHR, U., 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **54** (2–3): 68–82.
- WILSON, J.P., AGGETT, G.R., DENG, Y.X. & LAM, C.S., 2008: Water in the landscape: a review of contemporary flow routing algorithms. – ZHOU, Q., LEES, B. & TANG, G. (eds.): *Advances in Digital Terrain Analysis*: 213–236, Springer.
- WOOD, J.D., 1996: The geomorphological characterisation of digital elevation models. – PhD Thesis, University of Leicester, United Kingdom.

Addresses of the Authors:

Mag. Dr. MICHAEL VETTER, 1.) Research Groups Photogrammetry & Remote Sensing, Department of Geodesy and Geoinformation, Vienna University of Technology (TUW), Austria; 2.) CWRS – Centre for Water Resource Systems, TUW; 3.) Institute of Geography, University of Innsbruck, Austria, e-mail: office.michael.vetter@gmail.com

DI Dr. GOTTFRIED MANDLBURGER, Research Groups Photogrammetry & Remote Sensing, Department of Geodesy and Geoinformation, Vienna University of Technology, Austria, Tel. 0043-1-58801-12235, e-mail: gottfried.mandlbuerger@geo.tuwien.ac.at

Manuskript eingereicht: Februar 2013

Angenommen: November 2013



Visual Analysis of TerraSAR-X Backscatter Imagery for Archaeological Prospection

ROLAND LINCK, München, THOMAS BUSCHE & STEFAN BUCKREUSS, Wessling

Keywords: TerraSAR-X, SAR, satellite radar, archaeological prospection, synthetic aperture radar

Summary: The use of satellite radar widens the possibilities of archaeological prospection extremely. The resolution of the available sensors however was quite limited until now and only the detection of huge upstanding monuments or cultural landscapes was possible. The launch of TerraSAR-X, a German radar satellite in 2007, however, now offers a resolution of up to 1 m, which is required as a minimum for detecting small archaeological remains. Whereas upstanding monuments are clearly identifiable, it was still uncertain, whether the used high-frequency X-band waves of TerraSAR-X could penetrate the soil and provide information on buried archaeology as well. This paper shows the results of two test sites in Syria and Italy. Both of them have in common that there are extensive surveys by ground-based geophysical surveys with magnetometry and ground-penetrating radar, which provide information on the buried archaeological remains. By a detailed visual comparison of these results with the TerraSAR-X data, we can prove that there is a slight penetration depth of a few decimetres.

Zusammenfassung: *Visuelle Analyse von TerraSAR-X-Daten für die archäologische Prospektion.* Durch die Verwendung von Satellitenradar erweitern sich die Einsatzmöglichkeiten der archäologischen Prospektion enorm. Die geringe Auflösung der bisher verfügbaren Sensoren ließ jedoch nur eine Prospektion von großen obertägigen Bauwerken und Kulturlandschaften zu. Mit dem Start von TerraSAR-X, einem deutschen Radarfernerkundungssatelliten im Jahr 2007 ist nun eine Auflösung von bis zu 1 m möglich, die mindestens notwendig ist, um auch kleinere archäologische Befunde zu visualisieren. Während sich obertägige Befunde deutlich im Radargramm abzeichnen, war immer noch unklar, ob die hochfrequenten X-Band-Wellen von TerraSAR-X in den Boden eindringen und somit Informationen über die untertägige Archäologie liefern können. Dieser Artikel zeigt die Resultate von zwei Testflächen in Syrien und Italien, die diese Vermutung bestätigen. Von beiden liegen aufgrund großflächiger bodenbasierter Messungen mit Magnetometer und Bodenradar ausführliche Aussagen über die untertägige Archäologie vor. Der detaillierte visuelle Vergleich dieser Ergebnisse mit den TerraSAR-X-Daten zeigt, dass eine gewisse Eindringtiefe von einigen Dezimetern in den Boden zu erwarten ist.

1 Introduction

A new era in remote sensing by synthetic aperture radar (SAR) started by the launch of the German satellite TerraSAR-X in 2007. The first attempts to use SAR as a tool in the field of archaeological prospection were already made in the 1980s, shortly after the first SAR images by the satellite SEASAT were available. These results could only prove the existence of huge ancient remains like paleochannels, drainage systems and former cultural

landscapes (ADAMS 1980, ADAMS et al. 1981, ADAMS 1982, McCAULEY et al. 1982, WALKER 1982, POPE & DAHLIN 1989, HOLCOMB 1990, HOLCOMB 1992a, HOLCOMB 1992b, HOLCOMB & ALLAN 1992, SEVER 1998). The reason for this was the limited resolution of the first sensors. Smaller archaeological anomalies could hence not be identified. Therefore, also BLOM (1992) could only prove the existence of the lost town of Ubar (Oman) by several converging roads in the desert, but not by distinct remains of buildings. Newer research results on

archaeological prospection with SAR have been conducted in Italy (PIRO et al. 2011), Iraq and Sudan (PATRUNO et al. 2012), and Italy and North Africa (STEWART et al. 2012). The main problem of all these attempts was the limited spatial resolution of several metres, which made it necessary to apply special filter techniques like the H/α -decomposition. In contrast to that, the presented work is done with TerraSAR-X, which allows a spatial resolution of up to 1 m. Hence, the detection of small archaeological remains is possible. In distinction to the published results on SAR studies by other sensors (COMER & BLOM 2007, CHEN et al. 2012, TILTON & COMER 2012), the presented work was done by the visual analysis of identifiable linear archaeological remains in the TerraSAR-X amplitude images. The main effort of the presented study lies on the research on a potential penetration depth of the high-frequency X-band waves of TerraSAR-X into the soil. The detected buried linear archaeological features are afterwards verified by the results of ground-based geophysical surveys.

2 Data and Methods

2.1 Ground-based Geophysical Methods

For comparison and to verify the buried archaeological remains at the presented two test sites in Syria and Italy additional ground-based geophysical surveys with magnetometry and ground-penetrating radar (GPR) were carried out. While the measurements in Ostia were executed by HELMUT BECKER of the Bavarian State Department of Monuments and Sites (BLfD) in Munich, the one in Qreiye has been conducted by SIRRI SEREN of the Central Institute for Meteorology and Geodynamics (ZAMG) in Vienna, Austria.

Magnetometer prospecting

Magnetometry is a successful and cost-effective tool for the detailed mapping of large areas in a reasonable time (ENGLISH HERITAGE 2008). For our purpose and in order to reach the highest possible sensitivity combined with a maximum speed of prospection, the

so-called “duo-sensor” configuration (FASSBINDER 2010) was chosen. The probes are here mounted on a wooden frame and carried in a zigzag-mode 30 cm above the ground. The profiles are oriented approximately east-west in order to minimize technical disturbances of the magnetometer probes. The Scintrex Smartmag SM4G Special magnetometer provides a measurement of the geomagnetic field with sensitivity of ± 10 pT; for comparison: the value of the geomagnetic field, e.g. in Palmyra in March 1997, has been $45,440 \pm 30$ nT. For archaeological sites, normally around 90% of the magnetometer data has an anomaly of ± 10 nT. All measured features with stronger magnetization are due to burnt archaeological remains or pieces of iron (FASSBINDER & GORKA 2009).

Ground-penetrating radar

Ground-penetrating-radar (GPR) is an active geophysical method. It is based on electromagnetic waves propagating in the subsurface dependent on frequency, conductivity and dielectric properties of the material. At discontinuities, where these properties are changing, the radar waves are partially reflected (CONYERS 2004). Therefore, GPR is best for locating subsurface stonewalls and burnt brick walls. The soil parameters and the centre frequency of the antenna also determine the maximum penetration depth of the signal. A rule of thumb is that the signal penetrates deeper at a lower frequency, but these antennas have lower resolution. Hence, always a compromise between resolution and penetration depth has to be found. For archaeological purposes, antennas with a centre frequency between 400 and 900 MHz provide the best conditions. By registering the GPR data in three dimensions, it is possible to generate time or depth slices of variable thickness to show the exact depth structure of an archaeological object. This depicts a great advantage compared to magnetometer prospecting.

2.2 Space-borne Radar

For the presented SAR surveys, the TerraSAR-X satellite (TSX) was used. TSX car-

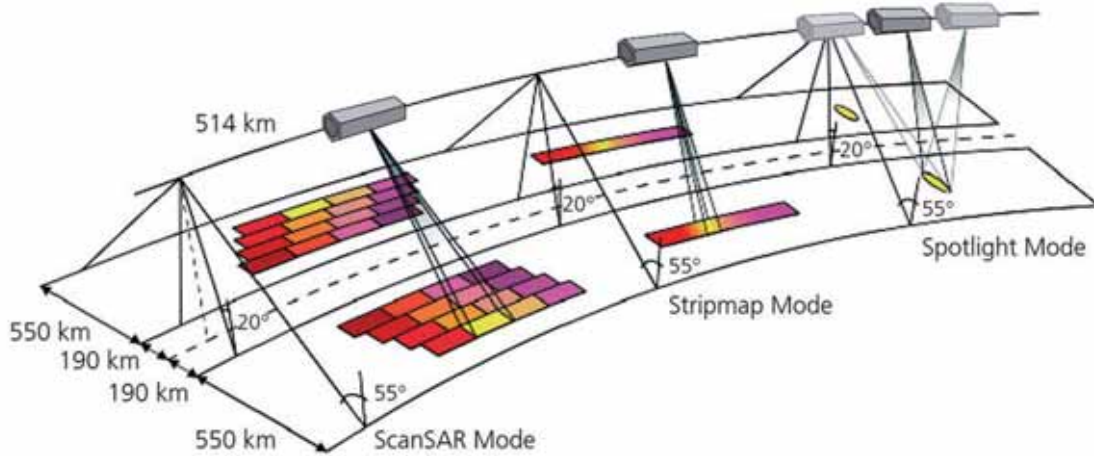


Fig. 1: TerraSAR-X offers three acquisition modes: Stripmap, ScanSAR and Spotlight; all of them are right- and left-looking. The acquisition mode determines the possible resolution and swath width (© DLR).

Tab. 1: Parameters of the TerraSAR-X Stripmap-mode (DLR 2009b).

Swath width	30 km (single polarized) 15 km (dual polarized)
Product length	50 km
Azimuth resolution	3.3 m (single polarized) 6.6 m (dual polarized)
Horizontal resolution	1.7 m – 3.5 m
Polarisation	HH or VV (single polarized) HH/VV, HH/HV, VV/VH (dual polarized)

ries a high frequency X-band SAR sensor that can be operated in three different modes and various polarizations. The Spotlight-, Stripmap- and ScanSAR-modes provide high-resolution images for a detailed analysis as well as wide swath data whenever a larger coverage is required (Fig. 1). The Stripmap-mode is the standard acquisition mode for SAR data and the typical inclination angles are between 20° and 60° (DLR 2009a, b). The parameters of TSX in Stripmap-mode can be seen in Tab. 1. The reduced swath width for dual polarization is caused by the doubling of the impulse frequency. Therefore, the DLR offers two data products: “stripNear” and “stripFar”.

Tab. 2: Parameters of the TerraSAR-X ScanSAR-mode (DLR 2009b).

Number of combined strips	4
Swath width	100 km
Product length	150 km
Azimuth resolution	18.5 m
Horizontal resolution	1.7 m – 3.5 m
Polarisation	HH or VV (single polarized)

The ScanSAR-mode is used to overcome the limitations of swath width in Stripmap-mode. This can be done by alternating between swaths with different inclination angles. Whereas this method enables a larger swath width, the azimuth resolution is lowered by the reduction of the Doppler spectra’s bandwidth (DLR 2009a, b) (Tab. 2).

In Spotlight-mode the radar beam is steered in flight direction to map a narrow target area with a high resolution (DLR 2009a, b). TSX uses a so-called “sliding-Spotlight”-mode with the steering point far outside of the target area. The different sliding contribution determines resolution and scene size and hence two Spotlight-modes are available (Tabs. 3 & 4). By using the experimental 300 MHz band-

width in the high-resolution Spotlight mode, it is possible to achieve a spatial resolution of 1 m. As for archaeological prospection only comparable small areas, but a very high resolution are required, this mode in a single polarization offers the best conditions. The DLR does not acquire these high-resolution products by default, so they have to be ordered separately within a scientific proposal.

The presented research was done with a time series of nine consecutive high-resolution Spotlight-TSX data takes between Feb-

ruary and May 2012 for Qreiye and a single data take of October 2012 for Ostia (see Tab. 5 for further details on the acquisition parameters). All data has been geocoded and ellipsoid corrected to the UTM WGS84 projection. The data correspond to the level 1b data of the TSX mission. The correction is done by an averaged surface height taken of the digital elevation model (DEM) of the shuttle radar topography mission (SRTM). The geometric precision is, as a result of the used high-quality science orbit, ca. 1 m.

The time series of Qreiye, which was acquired with the same parameters, should have only small deviations in the relative location of the single scenes, even though the absolute precision of the location is restricted by the quality of the DEM. Altogether the relative position of the images to each other should be two pixels with a pixel spacing of 0.5 m. The processing uses the first data take of 06/02/2012 as a reference. All other eight acquisitions are resampled by a cubic resampling method to the image bounds and the pixel spacing of this master image and compiled in a multichannel stack. No fine registration, e.g. using pixel correlation techniques, is performed. From this stack different multi-temporal (3, 6 and all 9 dates) average images are calculated by evaluating the unweighted average of the scenes on the base of the radar brightness β_0 under consideration of inclination angle, calibration constant and intensity. The huge advantage of this approach, in comparison to using only a single data take, is the enormously higher signal/noise-ratio of the resulting radar image. This allows a much better identification of the buried linear archaeological structures.

Tab. 3: Parameters of the TerraSAR-X high-resolution Spotlight-mode (DLR 2009b).

Scene size	5 km (azimuth) × 10 km (horizontal)
Azimuth resolution	1.1 m (single polarized) 2.2 m (dual polarized)
Horizontal resolution	1.5 m – 3.5 m
Polarization	HH or VV (single polarized) HH/VV (dual polarized)

Tab. 4: Parameters of the TerraSAR-X Spotlight-mode (DLR 2009b).

Scene size	10 km (azimuth) × 10 km (horizontal)
Azimuth resolution	1.7 m (single polarized) 3.4 m (dual polarized)
Horizontal resolution	1.5 m – 3.5 m
Polarization	HH or VV (single polarized) HH/VV (dual polarized)

Tab. 5: Parameters of the used data acquisitions of TerraSAR-X (SRA = single-receive antenna).

	Date	Beam	Orbit	Incidence angle	Pass direction	Polarization	Antenna receive configuration	Bandwidth
Qreiye	06/02/2012 – 26/05/2012	spot_039	54	34.9°	asc	HH	SRA	300 MHz
Ostia	19/10/2012	spot_048	93	38.7°	desc	HH	SRA	300 MHz

3 Study Sites

In this paper two test sites in Syria and Italy are presented. The first example shows a Roman fortress in Qreiye at the Euphrates River. It is located ca. 12 km northwest of the Syrian provincial capital Deir ez-Zor (Fig. 2a). The fortress was constructed in the early 3rd century AD and only used for around 50 years. Afterwards, it was abandoned and the area was never reconstructed until today (GSCHWIND & HASAN 2008). Aerial photos and optical satellite images (Fig. 3) show that only the surrounding wall-ditch-system of the fortress can nowadays be identified at the surface as a slight sandy hill. The internal layout of Qreiye is buried under a small layer of sand and can only be visualized by geophysical methods. Therefore, between 2002 and 2005 the whole fortress of ca. 5 ha size has been surveyed with GPR by SIRRI SEREN from the ZAMG in Vienna with a Sensors & Software PulseEKKO 1000 and a 900 MHz antenna, a GSSI SIR-3000 and a 400 MHz antenna, with Sensors & Software Noggin and a 500 MHz antenna. The GPR profiles have a crossline spacing of 25 cm or 50 cm and are orientated 45° to the archaeological remains to assure the detection of all buried features (SEREN et al. 2009). The corresponding depth slices between 0

and 100 cm depth show a typical structure of such Roman fortresses with orthogonal streets (*via decumana* and *via principalis*), official buildings (*principia*), storage buildings (*horrea*) and soldier barracks (GSCHWIND & HASAN 2008) (Fig. 4).

Our other test site is the Roman harbour in Ostia Antica (Fig. 2b) which is located ca. 25 km from Rome downstream the river Tiber. Only 50% – 60% of the ancient ruins have already been excavated. These can be mainly dated to the harbour city of ancient Rome in the first centuries AD. Ostia existed between the 4th century BC and the 5th century AD. Its zenith was in the 2nd century AD (DAI 2001). In Ostia a magnetometer survey was carried out by HELMUT BECKER of the BLfD in 1996/97 (HEINZELMANN et al. 1997, BECKER 1999). The corresponding magnetogram of this part of the Roman city Ostia Antica is characterized by several roads with a high magnetic anomaly due to the pavement with basaltic rocks (Fig. 5). These roads are flanked with adobe wall buildings. Hence, they have a positive magnetization, too. In the south, the remains of the early Roman city wall with a bypass road towards the sea can be identified. Spectacular is the detection of an Early-Christian basilica overlaying the Roman buildings. Consequent excavations proofed that this has been

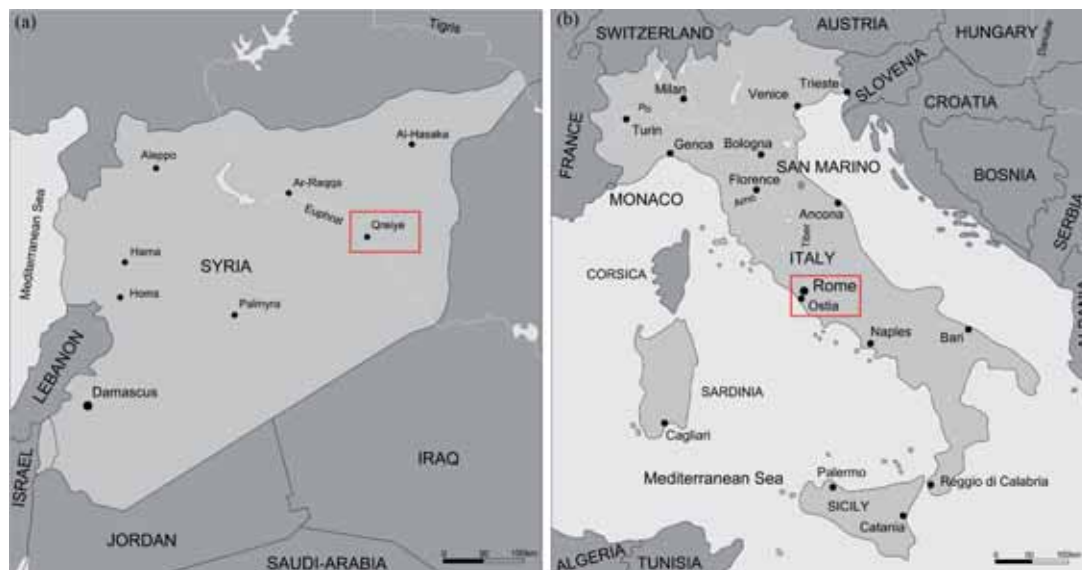


Fig. 2: (a) Topographical map showing the location of the archaeological site Qreiye in Syria; (b) Topographical map of Italy showing Ostia near the capital Rome. The two sites are marked with red rectangles.

the episcopal church founded by the famous emperor Constantine I. Aside of the archaeology, several diffuse, higher magnetic anomalies can be seen. They are caused by the geol-

ogy; more precisely by the slow sedimentation of shore terraces or fluvial shore sediments (HEINZELMANN et al. 1997, BECKER 1999).



Fig. 3: Qreiyeh. Optical satellite image of the fortress by GeoEye's OrbView-3 satellite. Date of data take: 19/03/2005; cloud coverage: 0%; panchromatic image with 1 m spatial resolution (Data available from the U.S. Geological Survey).



Fig. 4: Qreiyeh. Exemplary depth slice of 20 cm – 30 cm depth. Sensors & Software PulseEKKO 1000 with 900 MHz antenna, GSSI SIR-3000 with 400 MHz antenna, and Sensors & Software Noggin with 500 MHz antenna; sample interval: 5 cm x 25 cm or 50 cm (after: SEREN et al. 2009).

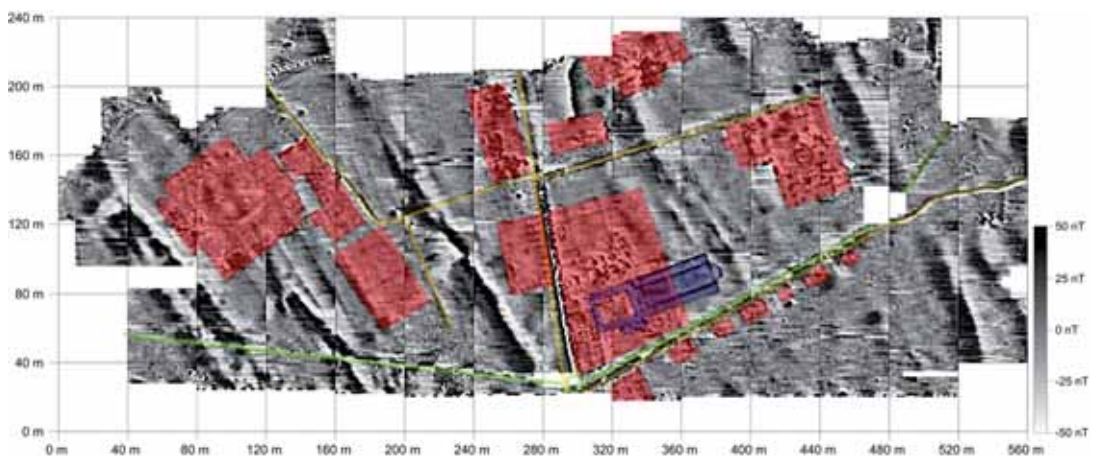


Fig. 5: Ostia. Magnetogram of the survey in the year 1996. Overlay with the high-pass filter to visualize the archaeological remains in more detail and a schematic digital interpretation of the visible features. Colour coding: red = Roman buildings, yellow = Roman roads, green = city wall, blue = Early-Christian basilica. Caesium Smartmag SM4G-Special, Quad-Sensor-configuration, Dynamics: ± 50 nT in 256 greyscales, sensitivity: ± 10 pT, point density: 50 cm x 25 cm, interpolated to 25 cm x 25 cm, 40-m-grids (after: BECKER 1999).

4 Results

4.1 Qreiye

As, apart from the enclosure wall, no further archaeological remains are visible at the surface, nearly all visible structures in the TerraSAR-X data have to be due to buried archaeology. Of course, also the quite huge remains of the western part of the fortification system can be identified (Fig. 6). The southern and eastern parts have been destroyed by the modern village ‘Ayyāš. In the north, no fortification has been erected, as this side has a natural protection by the steep slope towards the Euphrates. Moreover, a huge amount of further linear features can be distinguished in the TerraSAR-X image. The comparison with the GPR depth slices reveals that these structures correspond very well with the enclosure wall and several wall of the internal buildings of the fortress Qreiye (Fig. 6b). The visible walls belong to the central *principia*, several soldier barracks and storage houses. As a result of the still limited resolution of 1 m, not all distinct walls and buildings detected by GPR can be identified. Nevertheless, both methods show a similar layout of the Roman archaeological

remains and the results correspond very well. In addition to the known Roman features, several further structures corresponding to other buildings and the continuation of the fortification wall in the south are visible (LINCK 2013, LINCK et al. 2013). The last one could not be detected by GPR as its grid only covered the interior of the fortress and some small parts of the surrounding areas.

The detailed analysis of the SAR image reveals that the reflections of the basaltic fundaments of the walls cannot be distinguished from the reflections of the mud-bricks like in GPR and both show up mainly as dark anomalies. The reason could be that the reflected signal of both structures cannot reach the sensor anymore. In the case of the stone walls, it could be due to the reflection of the radar waves away from the satellite; the adobe bricks perhaps absorb the signal. In some cases in contrary the signal is backscattered towards the sensor by some parts of the basalt stones (LINCK 2013, LINCK et al. 2013).

The comparison of the TSX radargram with the GPR depth slices reveals that all visible archaeological structures belong to those appearing for the first time in a depth of 20 cm – 30 cm. Every feature lying deeper than

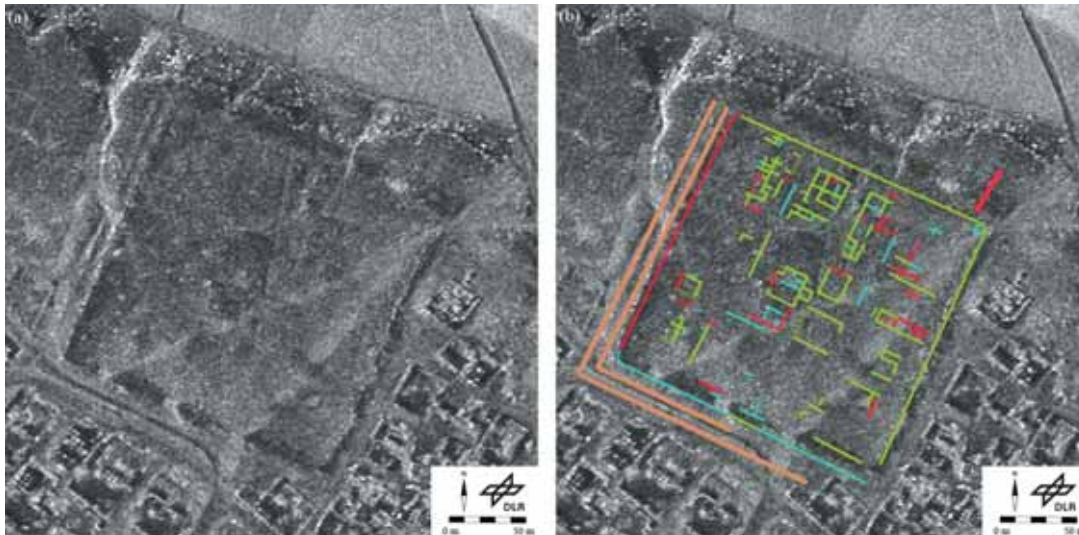


Fig. 6: Qreiye. (a) TerraSAR-X image of the Roman fortress. “High-resolution Spotlight mode” with experimental 300 MHz bandwidth; spatial resolution: 1 m; polarization: horizontal; inclination angle: 34.87°; stacking of all nine data takes; time of data take: February – May 2012 (© DLR 2012). (b) Overlay of the TerraSAR-X image with the digital interpretation of the visible remains. Colour coding: green = GPR result of 10 cm – 20 cm depth; red = GPR result of 20 cm – 30 cm depth; blue = features not mapped with GPR in any depth; brown = superficial remains of the rampart-ditch-system.

30 cm cannot be resolved with TSX. Hence, we can suppose that the X-band waves of the used sensor have a penetration depth of 20 cm – 25 cm in dry desert soil (LINCK 2013, LINCK et al. 2013). Until now, it was supposed that X-band waves cannot penetrate the soil at all. However, our results in Qreiye indicate that there is a small penetration depth in dry conditions.

4.2 Ostia

While the test site in Syria is situated in a dry desert climate and therefore provides very good conditions for the use of SAR to detect buried archaeological remains, the next example is from Italy. As it is characterized by a subtropical Mediterranean climate, totally different external conditions can be found.

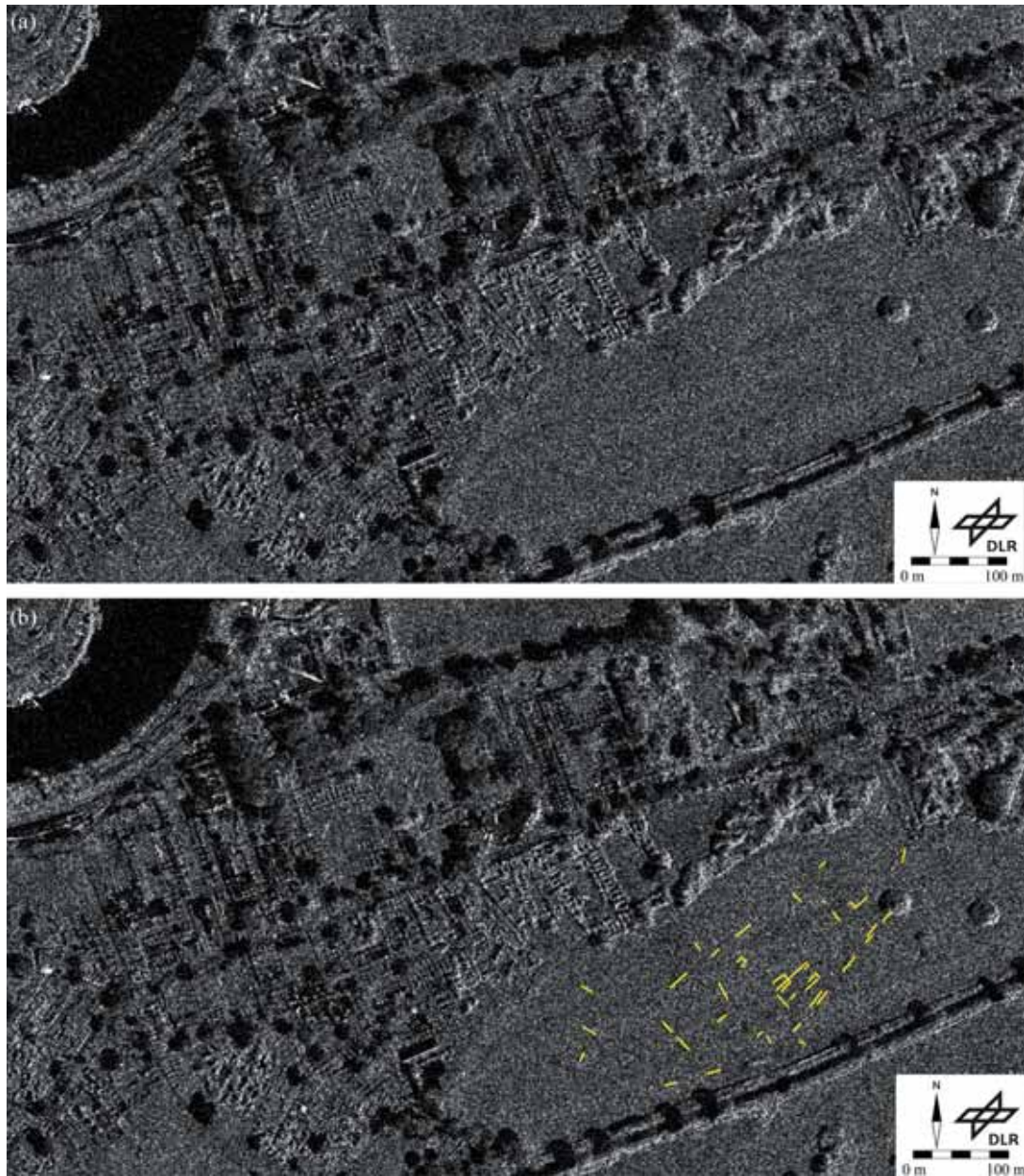


Fig. 7: Ostia. (a) TerraSAR-X image. “High-resolution Spotlight mode” with experimental 300 MHz bandwidth; spatial resolution: 1 m; polarization: horizontal; inclination angle: 38.7°; data take: 19/10/2012 (© DLR 2012). (b) Overlay of the TerraSAR-X image with the digital interpretation of the visible remains.

At the first glance, in the visually analysed TSX data, the upstanding monuments in the excavated part of Ostia Antica can be detected (Fig. 7). These are mainly the east-west running main road, several residential areas, remains of two huge storage buildings and of some temples and bathes. Because it has been restored in 1940, the theatre of Ostia depicts a very good reflector for the SAR waves, too.

But like in the afore-mentioned two examples, also traces of the buried archaeology can be identified. The following analysis concentrates on the area of the described magnetogram, as a proof of the detected remains can be given there. With TSX, parts of the Roman roads (inside the city, as well as the bypass), parts of the city wall and some walls of the Roman houses can be mapped (Fig. 7b). Whereas the north-south running road in the middle can be seen in the magnetogram very well because of an underlying adobe water pipe (Fig. 5), all roads appear at the same signal strength in the TSX image. The reason is that all road pavements reflect the electromagnetic waves in the same way and the pipeline cannot be visualized by a resolution of 1 m. The best mapped monument in this area is the basilica of Constantine, as it is preserved very well and lays very close to the surface.

In comparison to the test site in Qreiye, only few buried archaeological features can be identified in Ostia. The reason is the much higher soil moisture in Italy. So the penetration depth of the X-band waves is further reduced and the identification of buried archaeological remains becomes difficult.

5 Conclusion

The results of the two test sites illustrate that even the very high-frequency X-band waves of TerraSAR-X can penetrate the soil and buried features become visible by volume scattering in the ground. A comparison with the GPR depth slices reveals that it is possible to determine a rough estimation on the penetration depth. For dry and sandy desert soils this is approximately 20 cm – 25 cm. For higher soil moisture as well as vegetated ground, the possibility of TSX to resolve buried archaeological features is reduced dramatically. So the

method of SAR is best suitable to survey an archaeological site in the desert regions of the world. In these areas often the political situation does not allow ground-based investigations, neither by geophysical methods nor excavations. Hence, remote sensing is the only possibility to collect such data. Because of the short acquisition time, not only the sites themselves, but furthermore even their former cultural landscape can be mapped. So the archaeological remains can be set in a larger context. Due to the still limited resolution of the available SAR sensors of 1 m, afterwards ground-based geophysical measurements with magnetometry or ground-penetrating radar should follow in selected areas to generate an overall image of the site.

The presented results give a first overview on the huge possibilities of satellite radar in the field of archaeological prospection. In the future the gained knowledge will be applied on further test sites with different archaeological and climatic conditions. Another milestone for the use of SAR in archaeological prospection will be the possibility to acquire data in the new Staring-Spotlight-mode of TSX with an enhanced resolution of 25 cm in autumn 2013.

Acknowledgement

The authors want to thank firstly the German Aerospace Centre (Oberpfaffenhofen) for providing us with the TSX data of Ostia and Qreiye. We want to thank Dr. HELMUT BECKER of the Bavarian State Department of Monuments and Sites (Munich) for the permission to use their magnetograms of Ostia (Italy) for the presented research. For the GPR depth slices of Qreiye (Syria) we want to thank Dr. SIRRI SEREN of the Central Institute for Meteorology and Geodynamics (Vienna). Without these ground-based results the research on TerraSAR-X in archaeology would not have been possible.

References

- ADAMS, R.E.W., 1980: Swamps, Canals, and the Locations of Ancient Maya Cities. – *Antiquity* 54 (212): 206–214.

- ADAMS, R.W.E., BROWN, W.E. & CULBERT, T.P., 1981: Radar Mapping, Archaeology, and Ancient Maya Land Use. – *Science* **213** (4515): 1457–1463.
- ADAMS, R.W.E., 1982: Ancient Maya Canals – Grids and Lattices in the Maya Jungle. – *Archaeology* **35** (6): 28–35.
- BECKER, H., 1999: Prospecting in Ostia Antica (Italy) and the Discovery of the Basilica of Constantinus I. in 1996. – FASSBINDER, J.W.E. & IRLINGER, W.E. (eds.): *Archaeological Prospection*. – ICOMOS, Hefte des Deutschen Nationalkomitees **33**: 139–143, Karl M. Lipp Verlag, München.
- BLOM, R.G., 1992: Space Technology and the Discovery of Ubar, Point of Beginning. – *1992 Data Collector Survey* **17** (6): 11.
- CHEN, L., COMER, D.C., PRIEBE, C.E., SUSSMAN, D. & TILTON, J.C., 2012: Refinement of a method for identifying probable archaeological sites from remotely sensed data. – COMER, D.C. & HARROWER, M.J. (eds.): *Mapping Archaeological Landscapes from Space*. – Observance of the 40th Anniversary of the World Heritage Convention: 251–258, Springer.
- COMER, D.C. & BLOM, R.G., 2007: Detection and identification of archaeological sites and features using synthetic aperture radar (SAR) data collected from airborne platforms. – WISEMAN, J.R. & EL-BAZ, F. (eds.): *Remote sensing in archaeology*: 103–136, Springer.
- CONYERS, L.B., 2004: *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*. – AltaMira Press, Walnut Creek, CA, USA.
- DAI, 2001: <http://www.ostia-antica.org/heinzelm/daiproj.htm> (12.3.2013).
- DLR, 2009a: TerraSAR-X. Das deutsche Radarauge im All. – Publikationen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Köln.
- DLR, 2009b: TerraSAR-X Ground Segment. Basic Product Specification Document, <http://www.terrasar-x.dlr.de/> (28.12.2012).
- ENGLISH HERITAGE, 2008: *Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation*. – English Heritage Publications, Swindon, UK.
- FASSBINDER, J.W.E., 2010: Geophysikalische Prospektionsmethoden – Chancen für das archäologische Erbe. – EMMERLING, E. (ed.): *Toccare – Non Toccare*: 10–32, Siegl Verlag, München.
- FASSBINDER, J.W.E. & GORKA, T.H., 2009: Beneath the desert soil – archaeological prospecting with a caesium magnetometer. – REINDEL, M. & WAGNER, G.A. (eds.): *New technologies for archaeology. Multidisciplinary investigations in Palpa and Nasca, Peru*. – *First, Natural Science in Archaeology*: 49–69, Springer.
- GSCHWIND, M. & HASAN, H., 2008: Das römische Kastell Qreiyeh-‘Ayyāš, Provinz Deir ez-Zor, Syrien. Ergebnisse des syrisch-deutschen Kooperationsprojektes. – *Zeitschrift für Orient-Archäologie* **1**: 316–334.
- HEINZELMANN, M., BECKER, H., EDER, K. & STEPHANI, M., 1997: Vorbericht zu einer geophysikalischen Prospektionskampagne in Ostia Antica. – *Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung* **104**: 537–548.
- HOLCOMB, D.W., 1990: Satellite Imaging to Search for Lost Chinese Cities of the Silk Road. – DAVID, W. (ed.): *Spirit of Enterprise: The 1990 Rolex Awards*: 260–262, Buri Verlag, Bern, Switzerland.
- HOLCOMB, D.W., 1992a: Shuttle Imaging Radar and Archaeological Survey in China’s Taklamakan Desert. – *Journal of Field Archaeology* **19** (1): 129–138.
- HOLCOMB, D.W., 1992b: Space Shuttle Eyes Silk Road. – *Archaeology* **19** (1): 129–138.
- HOLCOMB, D.W. & ALLAN, J., 1992: Radar Data – An Important Source for the 1990s. – 18th Annual Conference of the Remote Sensing Society: 408–413, Dundee, UK.
- LINCK, R., 2013: *Methodische Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Boden- und Satellitenradarprospektion in der Archäologie*. – Shaker Verlag, Aachen.
- LINCK, R., BUSCHE, T., BUCKREUSS, S., FASSBINDER, J. & SEREN, S., 2013: Possibilities of archaeological prospecting by high-resolution X-band satellite radar – a case study from Syria. – *Archaeological Prospection* **20** (2): 97–108.
- MCCAULEY, J.F., SCHABER, G.G., BREED, C.S., GROGLIER, M.J., HAYNES, C.V., ISSAWI, B., ELACHI, C. & BLOM, R., 1982: Subsurface Valleys and Geoarchaeology of the Eastern Sahara Revealed by Shuttle Radar. – *Science* **218**: 1004–1020.
- PATRUNO, J., DORE, N., POTTIER, E. & SARTI, F., 2012: Comparison of polarimetric SAR sensors for archaeological purposes. – 3rd EARSeL Workshop “Advances in Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management” 66, Ghent, Belgium, in press.
- PIRO, S., CRESPI, M., DORE, N., PATRUNO, J. & ZAMUNER, D., 2011: Comparison of SAR data, optical satellite images and GPR investigations for archaeological site detection. – 9th International Conference on Archaeological Prospection: 169–171, Izmir, Turkey.
- POPE, K.O. & DAHLIN, B.H., 1989: Ancient Maya Wetland Agriculture: New Insights from Ecological and Remote Sensing Research. – *Journal of Field Archaeology* **16**: 87–106.
- SEREN, S., HINTERLEITNER, A., GSCHWIND, M., NEUBAUER, W. & LÖCKER, K., 2009: Combining data of different GPR systems of surveys of the ro-

- man fort Qreiyeh-‘Ayyash, Syria. *ArcheoSciences* **33**: 353–355.
- SEVER, T.L., 1998: Validating Prehistoric and Current Social Phenomena upon the Landscape of the Peten, Guatemala. – LIVERMAN, D., MORAN, E.F., RINDFUSS, R.R. & STERN, P.C. (eds): *People and Pixels*: 145–163, National Academy Press, Washington D.C., USA.
- STEWART, C., LASAPONARA, R. & SCHIAVON, G., 2012: Potential of Quad Pol C-band, Single and Dual Pol L-band SAR to identify buried archaeology. – 3rd EARSel Workshop “Advances in Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management” 30, Ghent, Belgium, in press.
- TILTON, J.C. & COMER, D.C., 2012: Method for identifying probable archaeological sites from remotely sensed data. – COMER, D.C. & HARROWER, M.J. (eds): *Mapping Archaeological Landscapes from Space*. – Observance of the 40th Anniversary of the World Heritage Convention: 241–249, Springer.
- WALKER, A.S., 1982: Deserts of China. – *American Scientists* **70**: 366–376.

Addresses of the Authors

Dr. ROLAND LINCK, 1.) Bavarian State Department of Monuments and Sites, Archaeological Prospection, Hofgraben 4, D-80539 Munich, Germany, 2.) Department of Earth and Environmental Sciences, Geophysics, Ludwig-Maximilians-University, Theresienstraße 41, D-80333 Munich, Germany, e-mail: roland.linck@blfd.bayern.de

THOMAS BUSCHE, Dr. STEFAN BUCKREUSS, German Aerospace Centre, Microwaves and Radar Institute, Münchner Straße 20, D-82234 Wessling, Germany, e-mail: {thomas.busche}{stefan.buckreuss}@dlr.de

Manuskript eingereicht: Juni 2013

Angenommen: November 2013

Berichte von Veranstaltungen

54th Photogrammetric Week, 9th–13th September 2013, Stuttgart

The 54th Photogrammetric Week was once again managed very ably by Professor DIETER FRITSCH, Head of the Institute for Photogrammetry and Remote Sensing at the University of Stuttgart. Invited speakers presented papers in the morning sessions, and the ‘Open PhoWo partners’, comprising the major companies which market equipment and software for the photogrammetric industry, presented workshops on their equipment and software in the afternoons. The Open PhoWo partners included Hexagon, Trimble, IGI, Microsoft Vexcel, BAE, and VisionMap which was a new partner on this occasion. The theme of the conference was ‘*From High Definition Point Clouds to Virtual Reality Models*’. During the conference the Carl Pulfrich Award was presented to NICHOLAS COOPS (Canada) and NORBERT HAALA (Germany).

The opening included a musical presentation and a welcome speech by Professor ALFRED KLEUSBERG, the Vice President for Teaching and Rectorate representative of the University of Stuttgart. Welcomes were also given by Professor DIETER FRITSCH and Professor CHEN JUN, President of ISPRS.

UWE FRANKE from Daimler Research gave the opening keynote presentation entitled ‘*How Cars Can See*’. The research, which has received multiple awards, is designed for pedestrian avoidance and control in traffic. Calibrated cameras are mounted on the windshield 22 cm apart. Processing is based on semi-global matching (SGM) incorporating FPGA hardware and fast algorithms for computer vision methods such as optical flow. The 6-D vision (2×3D) estimates position and motion of all tracked objects within 20 ms, which is twice as fast as a human can react. Stixels act as super pixels. It has been tested on 1 million km on roads and has shown to operate effectively at night. Precision of matching is 0.3



Fig. 1: Presentation of low-cost aerial platforms near the ifp-building, University of Stuttgart.



Fig. 2: Participants of the Photogrammetric Week in Stuttgart, 2013.

pixel, and there is a zero error expectation with the system.

The first morning then comprised presentations on the latest technology developments by the Open PhoWo partners. Very interesting talks were given by JACK ICKES (Hexagon Geospatial Division) about the latest details on Hexagon's imaging systems, RALPH HUMBERG (Trimble) about developments in Inpho's software for UAV/UAS, ALBRECHT GRIMM (IGI) about IGI's newest sensors, ALEXANDER WIECHERT (Microsoft Vexcel) about UltraCam/UltraMap, STEWART WALKER (BAE Systems) about the BAE pipeline based on the newest version of SOCET Set software, ADI GOZES (VisionMap) about VisionMap's A3 Edge camera and processing software, and finally KONRAD WENZEL (ifp, Uni Stuttgart) about ifp's dense matching software SURE.

The topics discussed in the following presentations came under three headings: (1) *Data Collection from Air, Space and Ground*; (2) *Advanced Methods of Computer Vision and Photogrammetry*; and (3) *Solving the Future Mapping Problems: All About 3D Modelling*. Slides of the presentations are available on the PhoWo web site. The full proceedings have been printed and are also available in digital form from ifp Stuttgart.

In addition to the oral presentation, a panel discussion was organized with following participants: DIETER FRITSCH (Moderator) SAMUEL BÄRISCH (DAF), JÜRGEN DOLD (Hexagon), LUC VAN GOOL (University Leuven), JUHA HYYPPÄ (FGI, Helsinki), DANIEL THALMANN (EPFL, Lausanne, Nanyang Technological University, Singapore), and ANDREAS ULRICH (Rieggl, Austria). Significant conclusions from the discussions are:

- Photogrammetry and Computer Vision collaboration has only just scratched the surface. We need efficient grammars for different situations, applications oriented grammars. We will have different grammars for the same operations and be able to convert between them.
- Some aspects of computer vision are not realistic, whereas photogrammetry is an ap-

plication with its feet on the ground. Computer vision is becoming more realistic with applications such as car surveillance, bundle adjustment etc..

- In computer vision, a pure bottom-up approach is not necessarily the correct approach, and researchers need to look at new approaches.
- Recent developments in airborne LiDAR include higher altitude, dual scanners, backward looking, green laser systems for rivers and coastlines, multiple wavelengths at 1.0, 1.5 and 2.5 μm . Also there are integrated cameras. Very dense sampling will be possible, perhaps 100 pt/m². Hard surfaces accuracy will be up to 10 mm. This will depend on GNSS system.
- Other developments in LiDAR include 400 MHz PRF, autonomous driving, LiDAR in backpacks for forest inventory, but developments in mobile LiDAR have not been as fast as expected.
- Developments for the future are expected to be sensor integration and integration of workflows, mobile LiDAR for indoors and integration of indoors and outdoors, automation of many processes. This will impact on all imaging. Almost real-time processing of LiDAR will be possible.
- Hexagon will not change its policy of supporting 2 camera systems. It is optimistic of future developments including its mobile system – Pegasus – which is now a complete system.
- The next market for GAF is development of software for next generation satellites such as Skybox involving 6, 20 or 24 satellites, and high resolution frame based imaging systems.

We thank the organizers for their tremendous job they did in managing this excellent event. The 55th Photogrammetric Week will be held from 7 – 11 September 2015.

JOHN TRINDER,
University of New South Wales, Australia

Hochschulnachrichten

Leibniz Universität Hannover

*Dissertation von MUHAMAD NASIR
A. ALRAJHI*

Herr M.Sc. MUHAMAD NASIR A. ALRAJHI wurde am 24.5.2013 an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover mit der Arbeit „*A Semi-Automated Procedure for Orthophoto Generation from High Resolution Satellite Imagery*“ zum Dr.-Ing. promoviert.

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN HEIPKE, Leibniz Universität Hannover; Koreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. MONIKA SESTER, Leibniz Universität Hannover und Prof. Prof. Dr. MUSHTAQ HUSSAIN, California State University, Fresno, USA.

Kurzfassung:

Das General Directorate of Surveying and Mapping (GDSM) als Teil des Ministeriums für Municipal and Rural Affairs (MOMRA) ist für die Produktion, Pflege und Bereitstellung von genauen Geodaten für alle Metropolregionen, Städte und ländlichen Siedlungen des Königreichs Saudi Arabien zuständig. Damit alle Planungen und Entwicklungsaktivitäten auf nationalen, regionalen und allen lokalen Stadtbereichen unterstützt werden können, unterhält das GDSM digitale Geodatenbasen, die die Produktion konventioneller Vektordaten und Orthobildkarten in den Maßstäben 1:1.000 bis 1:20.000 ermöglichen.

Die Schlüsselrolle, die die räumliche Information in den Planungs- und Entwicklungsprozessen spielt, wirkt sich wesentlich auf die erforderliche Aktualität der Daten aus. Die enorme Verstädterung führt zu einer schnellen Entwicklung der Infrastruktur, einem hohen Wachstum sowie rapiden Änderungen im urbanen und ländlichen Bereich. Die derzeitigen Verfahren zur Vergabe und für den Abschluss von Verträgen für neue Bildflüge, die dazugehörigen Passpunktbestimmungen mit ihren örtlichen Vermessungen sowie die photogrammetrische Auswertung und Kartenerstellung nehmen drei Jahre und mehr in An-

spruch. Die Verfügbarkeit aktueller hochauflösender Satellitenbilder stellt eine attraktive Alternative für eine schnelle, erforderliche Fortführung der Geodaten dar.

Orthobilder aus Satellitenbildern, die nur auf der direkten Sensororientierung basieren, die als rationale Polynomkoeffizienten zusammen mit den Bilddaten geliefert werden, können Abweichungen von vielen Pixeln aufweisen. Deswegen sind etliche Passpunkte erforderlich, um eine Genauigkeit im Pixelbereich zu erreichen. Die örtliche Bestimmung von Passpunkten ist zeitaufwändig. Das Hauptziel dieser Untersuchungen besteht darin, vorhandene Orthobilder und Basisinformationen anstelle traditioneller Passpunktbestimmungen für die Erstellung aktueller Orthobilder zu verwenden, um den ganzen Prozess durch Automatisierung zu beschleunigen.

Vorhandene Orthobilder mit 50 cm Objekt-pixelgröße (englisch ground sampling distance (GSD)) wurden als Georeferenzinformation für hochauflösende Satellitenbilder von GeoEye-1 mit 50 cm GSD, IKONOS mit 1 m GSD und SPOT-5 mit 2,5 m GSD genutzt. Die verwendeten Testbilder erfassen städtische, landwirtschaftliche und ländliche Bereiche. Basierend auf einer Reihe praktischer Untersuchungen wurde die Eignung des „Speeded-Up Robust Features (SURF)“ Algorithmus zur automatischen Zuordnung von Luft- und Satellitenbildern gezeigt. Die praktischen Ergebnisse der Bildzuordnung mit SURF wurden mit unterschiedlichen Maßstäben und verschiedenen Sensorbildern aus voneinander abweichenden Jahreszeiten überprüft. Die zugeordneten Verknüpfungspunkte wurden benutzt, um die orthorektifizierten Satellitenbilder mittels zweidimensionaler Affintransformation auf die Luftbild-Orthobilder zu beziehen. Die so mittels SURF georeferenzierten GeoEye-1 und IKONOS-Bilder erfüllen die Genauigkeitsstandards von MOMRA für den Maßstab 1:10.000. Dagegen konnten mit den niedriger aufgelösten SPOT-5 Bildern diese Genauigkeitsanforderungen nicht erfüllt werden.

Die Untersuchungen haben zu einem einfachen und effizienten Verfahren für die Georeferenzierung hochaufgelöster Satellitenbilder mit 50 cm und 1 m GSD geführt, das für die Fortführung der Karteninformationen benutzt werden kann und die Genauigkeitsanforderungen von MOMRA für den Maßstab 1:10.000 erfüllt. Dieses Verfahren ersetzt vollständig die örtliche Passpunktbestimmung und die manuelle Bildmessung durch erfahrene Auswerter. Etwa 5 bis 7 Satellitenbilder können so innerhalb eines Tages orientiert werden, was für die Kartenproduktion zufriedenstellend ist. Die Implementierung des Verfahrens bei MOMRA wird die Möglichkeit zur schnellen Reaktion auf Anforderungen zu aktuellen Kartendaten erheblich verbessern.

Die Dissertation ist in der Schriftenreihe „Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover“ (ISSN 0174-1454) als Heft Nr. 307 erschienen.

Dissertation von ANTJE THIELE

Frau Dipl.-Ing. ANTJE THIELE wurde am 18.1.2013 an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover mit der Arbeit „3D Building Reconstruction from High Resolution Multi-Aspect Interferometric Synthetic Aperture RADAR Data“ zum Dr.-Ing. promoviert.

Referent: Prof. Dr.-Ing. UWE SÖRGEL, Leibniz Universität Hannover; Koreferenten: Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. habil. STEFAN HINZ, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Dr.-Ing. CLAUS BRENNER, Leibniz Universität Hannover.

Kurzfassung:

Die Hauptvorteile der Synthetic Aperture Radar-Technik (SAR) sind die Wetter- und Tageszeitunabhängigkeit, die den Einsatz dieser Technik insbesondere für Anwendungen mit zeitkritischer Datenerhebung, z. B. Erfassung von Katastrophen wie Überschwemmungen, Erdbeben oder Erdbeben, anbieten.

Die neue Generation luftgetragener SAR-Sensoren, z. B. PAMIR, MetaSensing und STAR-Serie, und satellitengestützter SAR-Sensoren, z. B. TerraSAR-X, ermöglicht die

großflächige Aufnahme von Gebieten in einer geometrischen Auflösung von einigen Metern bis Dezimetern. Diese räumliche Auflösung ermöglicht eine detaillierte Analyse städtischer Gebiete, beginnend bei industriellen Anlagen bis hin zu Wohnhäusern. Neben der Aufnahme von einzelnen SAR-Streifen, die für Kartierungen genutzt werden, können in einer across-track Konfiguration der Sensoren single-pass oder repeat-pass interferometrische SAR- (InSAR) Daten aufgezeichnet werden. Die InSAR-Phasen ermöglichen die Berechnung eines Digitalen Oberflächenmodells für das aufgenommene Gebiet. Basierend auf diesen drei-dimensionalen (3D) Informationen ist nicht nur eine Objekterkennung sondern auch eine Objektrekonstruktion möglich.

In dieser Dissertation wird detailliert die Gebäudesignatur in InSAR-Daten analysiert, um die Auswahl geeigneter Objektmerkmale für die Gebäuderekonstruktion zu gewährleisten. Das Erscheinungsbild von Gebäuden in SAR-Magnituden-Bildern und InSAR-Phasen ist gekennzeichnet durch typische Signalverteilungen, die von Bereichen direkter Reflexion, z. B. layover, Mehrfachreflexion, z. B. am Gebäudecorner, und ohne Rückstreuung, z. B. Radarschatten, herrühren. Die Analyse berücksichtigt InSAR-Daten verschiedener Sensortypen, Sensorkonfigurationen, Aufnahmegeometrien und Gebäudetypen, um die geeignetsten Gebäudemerkmale zu extrahieren.

Anschließend erfolgt die Vorstellung eines neuen Verfahrens zur Gebäuderekonstruktion anhand unterschiedlicher Merkmale. Da speziell in dicht besiedelten Gebieten Abschattungen zwischen benachbarten Gebäuden und Bäumen die Rekonstruktion erschweren, werden Daten aus verschiedenen Richtungen (multi-aspekt Daten) berücksichtigt, um Lücken zu schließen. Zuerst werden aus der Magnituden- und InSAR-Phasensignatur die Gebäudemerkmale unabhängig für jede Aufnahmeorientierung extrahiert. Anschließend werden die Merkmale in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt und fusioniert. Die Generierung der Gebäudehypothesen erfolgt in einem Gruppierungsschritt, der auf den Multi-aspekt-Merkmalen fußt. Anhand der generierten Gebäudehypothesen erfolgt eine Simulation der InSAR-Phasen. Des Weiteren wird eine Filterung der InSAR-Phasen durch-

geführt, die den Abgleich zwischen realen und simulierten Daten verbessert. Anhand ihrer Ähnlichkeit wird über die Notwendigkeit einer Nachprozessierung entschieden. Abschließend werden generierte Gebäudehypothesen aktualisiert und deren Gebäudedachgeometrie ermittelt.

Der entwickelte Algorithmus wird anhand von erfolgten InSAR-Daten eines städtischen Gebietes getestet. Die Bewertung der erzielten Rekonstruktionsergebnisse erfolgt durch Berücksichtigung von Kataster- und LIDAR-Daten als Referenz.

Die Dissertation ist in der Schriftenreihe „Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover“ (ISSN 0174-1454) als Heft Nr. 306 erschienen. Gleichzeitig ist die Arbeit in der Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (ISSN 0065-5325) unter der Nr. C 708 online veröffentlicht (www.dgk.badw.de).

Karlsruher Institut für Technologie

Dissertation von DANIELA RICHTER

Frau Dipl.-Ing. DANIELA RICHTER wurde am 18.9.2013 an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie mit der Arbeit „How People Describe their Place – Approaches to Interpreting and Formalizing of Place Descriptions“ zum Dr.-Ing. promoviert.

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. STEFAN HINZ, Karlsruher Institut für Technologie.
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. STEPHAN WINTER, Universität Melbourne, Australien.

Kurzfassung:

Ortsbeschreibungen stellen für Menschen eine gängige Methode dar, um Standorte oder Wege zu beschreiben sowie Dinge in ihrer Umgebung zu lokalisieren oder Informationen über eine Region zu erfragen. Während das Verstehen von Ortsbeschreibungen für Menschen eine triviale Aufgabe ist, haben Computer Schwierigkeiten bei der Erzeugung oder Interpretation von natürlich-sprachlichen Weg- oder Ortsbeschreibungen. Natürlich-

sprachliche Ausdrücke zur Beschreibung von Orten wie „Hotels in der Innenstadt“ oder „die Bibliothek in der Nähe des Hauptbahnhofs“ würden dem Menschen eine leistungsfähige Schnittstelle zur Interaktion mit georäumlichen Diensten bieten. Zudem steigt mit dem enormen Anstieg an nutzergenerierten Inhalten, welche Ortsbeschreibungen enthalten, auch der Bedarf an automatisierbaren Verfahren für deren Interpretation.

Ortsbeschreibungen sind häufig hierarchisch strukturiert, d.h. Elemente feinerer Granularität werden durch implizite oder explizite räumliche Relationen an Referenzen größerer Granularität verankert. Beispielsweise dient in der Ortsbeschreibung „Melbourne in Australien“ die Referenz „Australien“ zur eindeutigen Unterscheidung des Ortes „Melbourne“ von anderen Orten gleichen Namens. Damit stellen die Gewinnung von räumlichen Informationen und die Klassifikation der räumlichen Granularität eine wesentliche Grundlage für die Interpretation von Ortsbeschreibungen dar. In dieser Hinsicht sind das Wissen über Sprachmuster und die Verwendung einer geeigneten Systematik zur Klassifikation der räumlichen Granularität unerlässlich. Folgende Fragestellungen werden in den verschiedenen Teilen der kumulativen Dissertation untersucht: Welche dominanten Arten von Ortsbeschreibungen gibt es? Welche verschiedenen Arten von hierarchischen Strukturen verwenden sie? Können Abweichungen in Form von flachen Strukturen oder Lücken zwischen den Granularitätsebenen in Zusammenhang mit der angewandten Klassifikation der räumlichen Granularität gebracht werden? Und schließlich, welche Rolle spielen räumliche Relationen bei der Definition des tatsächlichen Standortes?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine systematische Studie von Ortsbeschreibungen durchgeführt, welche durch ein Handy-Spiel gesammelt wurden. Der erste Teil der Arbeit entwickelt ein Klassifikationsschema für charakteristische Parameter von Ortsbeschreibungen und nutzt dieses zur Annotation des gesammelten Korpus. Basierend darauf wurde ein agglomeratives Cluster-Verfahren durchgeführt, um dominierende Arten von Ortsbeschreibungen zu identifizieren. Unter

Verwendung des Klassifikationsmerkmals räumliche Granularität werden im zweiten Teil verschiedene hierarchische Strukturen sowie die sequenzielle Abfolge der enthaltenen Granularitätsebenen identifiziert. Im dritten Teil wird die feinste Granularität der tatsächlichen Lage bestimmt, welche durch die Ortsbeschreibung referenziert wird. Hier werden Methoden zur Auflösung von Ortsbeschreibungen entwickelt, welche sowohl die Granularität der Orte als auch die beteiligten räumlichen Beziehungen zwischen ihnen berücksichtigen. Abschließend werden im vierten Teil der Arbeit verschiedene Ansätze zur Klassifikation räumlicher Granularität untersucht, um Abweichungen von den allgemeinen hierarchischen Strukturen, wie Lücken oder flache Strukturen, zu erklären.

Die erzielten Forschungsergebnisse tragen dazu bei, die Art und Weise zu verstehen, wie Menschen Orte beschreiben. Dieses Verständnis ist von wesentlicher Bedeutung für die Entwicklung von intelligenten Navigationssystemen und standortgebundenen Diensten oder im Katastrophenmanagement, welches eine schnelle Auswertung von natürlichsprachlichen Berichten erfordert. Sie zeigen ferner die Notwendigkeit und Wichtigkeit von flexibleren Modellen von Hierarchien in der Interaktion mit den Nutzern von standortgebundenen Diensten. Das Wissen um die feinste Granularität eines beschriebenen Ortes unterstützt die Auflösung von Ortsbeschreibungen, zum Beispiel in der geografischen Informationsgewinnung oder Lokalisierung. Die Ergebnisse der prototypischen Implementierung zeigen, dass die entwickelten Verfahren meist plausible und gute Ergebnisse liefern. Sie unterstreichen jedoch auch die Notwendigkeit weiterer Forschungstätigkeiten in diesem Bereich.

Technische Universität Dresden

Dissertation von EMIL BAYRAMOV

Herr M.Sc. EMIL BAYRAMOV, promovierte am 17.1.2013 am Institut für Kartographie, Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden mit der Arbeit „*Quantitative Assessment of Vegetation Renaturation*

and Soil Degradation and their Control by Climate and Ground Factors along Rights-of-Way of Petroleum/Gas Pipelines, Azerbaijan“.

1. Gutachter: Prof. Dr. MANFRED BUCHROITHNER, TU Dresden, Institut für Kartographie.
2. Gutachter: Prof. Dr. CHINGIZ ISMAYILOV, Baku State University.

Abstract:

The construction of Baku-Tbilisi-Ceyhan (BTC) Oil and South Caucasus Gas (SCP) pipelines were completed in 2005. The Azerbaijan section of BTC Oil and SCP Gas pipelines is 442 km long and has a 44 m wide corridor named as the Right-of-Way. BTC and SCP pipelines are aligned parallel to each other within the same 44 m corridor. The construction process of the pipelines significantly disturbed vegetation and soil cover along the Right-of-Way of pipelines. The revegetation and erosion control measures were conducted after the completion of construction to restore the disturbed footprints of construction activities. The general goals of the present studies dedicated to the environmental monitoring of revegetation and planning of erosion control measures were: to evaluate the status of the revegetation in 2007 since the completion of the construction activities in 2005, to determine the climate and ground factors controlling the vegetation regrowth and to predict erosion-prone areas along Right-of-Way of pipelines. Regression and root-mean-square error analysis between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of IKONOS images acquired in 2007 and in-situ estimations of vegetation cover percentage revealed R^2 equal to 0.80 and RMSE equal to 6% which were optimal for the normalization of NDVI to vegetation cover. The total area of restored vegetation cover between 2005 and 2007 was 8,900,000 m². An area of 10,700,000 m² of ground vegetation needed restoration in order to comply with the environmental acceptance criteria. Based on the global spatial regression model, precipitation, land surface temperature and evapotranspiration were determined as the main climate factors controlling NDVI of grasslands along Right-of-Way of pipelines. In case of croplands, precipitation, evapotranspiration and annual minimum temperature were deter-

mined as the main factors controlling NDVI of croplands. The regression models predicting NDVI for grasslands and croplands were also formulated.

The revegetation and erosion control measures also included the determination of the land surface temperature, the precipitation, the soil moisture, and the ground water level, as well as their interrelation. For this purpose, apart from the NDVI a number of other models were used for deriving control values: global spatial regression model, geographically weighted regression, Morgan-Morgan-Finney (MMF), and universal soil loss equation (USLE).

Dissertation von ROBERT HECHT

Herr Dipl.-Ing. ROBERT HECHT promovierte am 10.6.2013 am Institut für Kartographie, Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden mit der Arbeit „*Automatische Klassifizierung von Gebäudegrundrissen – Ein Beitrag zur kleinräumigen Beschreibung der Siedlungsstruktur*“ zum Dr.-Ing.

1. Gutachter: Prof. Dr. MANFRED BUCHROITHNER, TU Dresden, Institut für Kartographie.
2. Gutachter: Dr.-Ing. GOTTHOLD MEINEL, Leibniz Institut für Ökologische Raumentwicklung Dresden.
3. Gutachter: Prof. Dr. NGUYEN XUAN THINH, TU Dortmund, Fachgebiet Raumbezogene Informationsverarbeitung und Modellbildung.

Abstract:

Small-scale information on functional, morphological and socio-economic structure is necessary to provide answers for research and planning issues in urban and rural areas. Buildings are of key importance here, since they determine the physical structure of a settlement. Moreover, their types of occupancy create the distribution pattern of housing, workplaces and infrastructure. Despite their significance both for researchers and planners, such data is often not up to date, strongly spatially aggregated or only very locally available. Building footprints are registered and maintained in the real estate cadastre and in topographic-cartographic information systems by the survey administration. They are available to the public in the form of geospa-

tial data, maps and online services. However, semantic information on building function, type of housing, building age, or numbers of floors is sparse. The Working Committee of the Surveying Authorities of the States of the Federal Republic of Germany (AdV) specifies only a mandatory differentiation between “residential”, “public” and “industrial/commercial” buildings in the cadastre. Some official building data, like the nationwide product “Amtliche Hausumringe” (official building footprints) as well as buildings extracted from maps, laser scanner data, aerial photographs or satellite imagery, contain initially no attributes at all. Therefore, users are often faced with a pure building geometry, a basis which can contribute only little knowledge about the settlement structure. However, appropriately classified building footprints would allow them to obtain additional indicators of the settlement structure, such as building density, floor area, and number of housings and residents, all of which can be derived and visualized by means of GIS technology.

In this thesis, methods for the automatic classification of building footprints are developed, analyzed and assessed, with the aim of using them for a small-scale description of the settlement structure. The procedure presented follows a data-driven pattern recognition approach using training samples with known classes and features of buildings. The work addresses issues of data integration, data processing, feature extraction, and feature selection and investigates the accuracy of various classification methods. Currently, as is shown, there are only a few scientific studies that pursue the use of pattern recognition and machine learning for building classification. Many approaches rely on knowledge-based models which are not very flexible when the data input or the desired target classes change. Moreover, for many approaches, there is no critical accuracy assessment by means of independent test data. Therefore, when developing a procedure for automatic building classification, particular attention has been paid to flexibility, automation and reliable validation. The developed approach makes use of basic topographic objects only: building footprints, official building coordinates and urban blocks. Thus, a nationwide applicability of the method is en-

sured for Germany and countries with comparable data sources. Out of the stock of spatial base data on buildings available in Germany, five different input data types have been identified, which differ in structure (raster or vector), geometric modelling (individual buildings or building-regions), and semantic information content (with or without information on building use). For each input data type, an extensive set of features has been developed, with which all objects and relations are described at various spatial levels, e.g. single building, building complex, urban block, or a defined neighbourhood. The features are calculated using methods of digital image processing and spatial analysis within a GIS environment. Highly correlated features are removed from these sets by using a filter-based feature selection. Since it can be assumed that the building typology will be known in the context of the settlement structure analyses, a supervised learning strategy has been preferred for training the classifier. At the same time, supervised machine learning procedures, unlike unsupervised ones, allow an immediate assessment of the prediction error, with no necessity for any “sophisticated” data interpretation.

A reference database with over 800,000 building footprints has been created for the accuracy assessment, in which the building type for each building is provided, which corresponds to a defined building typology. The typology distinguishes between eleven classes according to urban planning criteria. Various types of settlement (city, town or village) and several administrative databases (DTK25-V, DTK25, ATKIS®, ALK, 3D building models) are considered, which enables a differentiated evaluation of accuracy. In a model selection process, 16 different supervised classification methods are tested on selected datasets, and their generalization capabilities have been evaluated based on a ten-fold cross-validation. The following models are used: linear models, non-parametric models, support vector machines, artificial neural networks, decision trees and ensemble methods. Non-linear models, like the ensemble-based random-forest algorithm, show the highest degree of generalization capability and efficiency. Random forest has been chosen as the best classifier,

since it also has a number of other practical advantages over other methods, as it does not absolutely require either data scaling nor feature selection. Moreover, categorical features can be processed directly and the algorithm provides measurements to quantify the importance of the features. After the selection of a classification procedure, a detailed accuracy assessment based on all datasets in the reference data base is performed. Based on confusion matrices and quality measures derived from them, the classifier is evaluated and assessed separately according to input data type and study area. For vector-based building footprints, especially buildings from ALK/ATKIS®, ATKIS® or official building footprints and 3D building models, an overall accuracy between 90% and 95% could be achieved. The accuracy when using building footprints extracted from digital topographic raster maps was less – only 76% to 88%. In a simulation, it was shown that the sizes of training data have a major impact on the classification accuracy. One challenge in particular can be found in regional differences in the cultural-historic architectural structure between cities. Attempts to train and test a random forest classifier between cities of different architectural characteristics have shown the limitations of the transferability. A nationwide application of the method will therefore necessarily require regional delimitation and the collection of separate training data in each of the regions.

The automatic classification of building footprints provides an important contribution to the acquisition of new information for the small-scale description of settlement structures. In addition to its relevance for research and application areas of urban geography and urban planning, the results are also relevant for cartographic disciplines such as map generalization, automated mapping and geo-visualization.

Dissertation von CHRISTINA EISFELDER

Frau Dipl.-Ing. CHRISTINA EISFELDER promovierte am 20.6.2013 am Institut für Kartographie, Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden mit der Arbeit „Modelling Net Primary Productivity and Above-Ground Biomass for Mapping of Spa-

tial Biomass Distribution in Kazakhstan“ zur Dr.-Ing.

1. Gutachter: Prof. Dr. MANFRED BUCHROITHNER, TU Dresden, Institut für Kartographie.
2. Gutachter: Prof. Dr. STEFAN DECH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Oberpfaffenhofen.
3. Gutachter: Prof. Dr. MARTIN KAPPAS, Georg-August-Universität Göttingen, Institute of Geography.

Abstract:

Biomass is an important ecological variable for understanding the responses of vegetation to the currently observed global change. The impact of changes in vegetation biomass on the global ecosystem is also of high relevance. The vegetation in the arid and semi-arid environments of Kazakhstan is expected to be affected particularly strongly by future climate change. Therefore, it is of great interest to observe large-scale vegetation dynamics and biomass distribution in Kazakhstan. At the beginning of this dissertation, previous research activities and remote-sensing-based methods for biomass estimation in semi-arid regions have been comprehensively reviewed for the first time. The review revealed that the biggest challenge is the transferability of methods in time and space. Empirical approaches, which are predominantly applied, proved to be hardly transferable. Remote-sensing-based net primary productivity (NPP) models, on the other hand, allow for regional to continental modelling of NPP time-series and are potentially transferable to new regions.

This thesis thus deals with modelling and analysis of NPP time-series for Kazakhstan and presents a methodological concept for derivation of above-ground biomass estimates based on NPP data. For validation of the results, biomass field data were collected in three study areas in Kazakhstan. For the selection of an appropriate model, two remote-

sensing-based NPP models were applied to a study area in Central Kazakhstan. The first is the regional biomass model (RBM). The second is the biosphere energy transfer hydrology model (BETHY/DLR). Both models were applied to Kazakhstan for the first time in this dissertation. Differences in the modelling approaches, intermediate products, and calculated NPP, as well as their temporal characteristics were analysed and discussed. The model BETHY/DLR was then used to calculate NPP for Kazakhstan for 2003 – 2011. The results were analysed regarding spatial, intra-annual, and inter-annual variations. In addition, the correlation between NPP and meteorological parameters was analysed. In the last part of this dissertation, a methodological concept for derivation of above-ground biomass estimates of natural vegetation from NPP time-series has been developed. The concept is based on the NPP time-series, information about fractional cover of herbaceous and woody vegetation, and plants' relative growth rates (RGRs). It was the first time that these parameters are combined for biomass estimation in semi-arid regions. The developed approach was finally applied to estimate biomass for the three study areas in Kazakhstan and validated with field data.

The results of this dissertation provide information about the vegetation dynamics in Kazakhstan for 2003 – 2011. This is valuable information for a sustainable land management and the identification of regions that are potentially affected by a changing climate. Furthermore, a methodological concept for the estimation of biomass based on NPP time-series is presented. The developed method is potentially transferable. Provided that the required information regarding vegetation distribution and fractional cover is available, the method will allow for repeated and large-area biomass estimation for natural vegetation in Kazakhstan and other semi-arid environments.

Nachruf

Anfang November verstarb Prof. Dr.-Ing. FRANZ JOSEF HEIMES nach schwerer Krankheit. HEIMES wurde 1939 in Saalhausen im Sauerland geboren und blieb sein Leben lang dieser Gegend und ihren Bewohnern aufs Tiefste verbunden, auch wenn er sich zwischenzeitlich räumlich sehr weit davon entfernte.

Nach seinem Abitur 1959 studierte er Geodäsie an der Universität Bonn und der ETH Zürich. In Zürich konnte er hervorragend seine vielfältigen Interessen mit dem Skifahren, kombinieren. Um seine stärkste Leidenschaft realisieren zu können, machte er 1966 seinen Flugschein in Hangelar bei Bonn. Im Anschluss an seine Promotion 1967 war HEIMES Mitglied einer Internationalen Grönlandexpedition. Anschließend ging er mit einem VW Bulli auf eine ausgedehnte Weltreise, die ihn unter anderem nach Afghanistan, Indien, Japan und die USA brachte. Von 1968 bis 1978 war HEIMES im ITC tätig. Im Rahmen dieser Tätigkeit erwarb er den Berufspilotenschein für zweimotorige Flugzeuge und unternahm Ausbildungsflüge mit seinen Studenten in verschiedenste Länder, unter anderem mehrfach nach Algerien. Die Internationalität am ITC hat ihn sicherlich sehr geprägt und auch bei seiner anschließenden Professur für praktische Geodäsie und Photogrammetrie an der Fachhochschule Bochum von 1978 bis 2005 entscheidend beeinflusst.

Von 1982 bis 1984 entwickelte er in Kooperation mit der Uni Siegen ein Bildflugnavigationssystem, damals noch auf Basis von am Boden installierten Sendestationen. Dieses wurde von ihm bei einer deutschen Antarktis-Expedition 1984/85 erfolgreich zur Navigation bei einer luftgestützten Magnetfeldmessung eingesetzt.

Als Professor für Photogrammetrie in Bochum verstand es FRANZ JOSEF HEIMES den Studenten die Begeisterung für „sein“ Fach auf unnachahmliche Weise näher zu bringen. Selbst wenn er über die Kammerkonstante sprach, hatte man als Student den Eindruck,

man würde einen der spannendsten Sachverhalte vermittelt bekommen. HEIMES war begeistert von der Idee, mit kleinen Flugzeugen und kleinen Kamerasystemen, in Kombination mit einer guten Navigation kostengünstige Alternativen zur Befliegung mit großformatigen Kameras zu schaffen. Dies führte im Laufe der Jahre zu vielen Vorführungen, Kongressen und Schulungen, die uns u. a. nach Kanada, Mexico, Iran, China, Pakistan und auf die Philippinen führten. In fast allen Ländern traf er auf ehemalige Studenten seiner ITC Zeit mit der Folge einiger erinnerungswürdiger Wiedersehensfeiern.



Mit dem Bau seines eigenen Flugzeuges, einer Pulsar XP, erfüllte HEIMES sich einen lang gehegten Traum. Im Anschluss an seine Pensionierung führte er mit seiner Pulsar weiterhin Bildflüge durch und blieb seinem beruflichen Tätigkeitsfeld stets aktiv verbunden. So flog er noch vier Wochen vor seinem zu frühen Tod zusammen mit einem Freund einen vierstündigen Bildflug über Berlin.

Bei allen seinen Projekten und Tätigkeiten konnte man nicht anders, als sich von seiner unbändigen Lebensfreude und seiner Begeisterung für Photogrammetrie anstecken zu lassen.

Meine Gedanken sind bei seiner Frau Ute und seiner Familie.

RAINER BRECHTKEN, Bochum

Unmanned Aerial Systems (UAS) – Mitteilung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung veröffentlichte am 1.10.2013 eine Broschüre über rechtliche Rahmenbedingungen zur Nutzung von unbemannten fliegenden Kleinplattformen. Die wichtigsten Auszüge aus der Broschüre werden im Folgenden wiedergegeben; die vollständige pdf-Datei „unbemannte-luftfahrtsysteme.pdf“, ist zu finden unter „www.bmvbs.de“.

Bei der Kategorie der unbemannten Luftfahrtsysteme (UAS) handelt es sich um unbemannte Fluggeräte, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden. Dabei erfolgt die Abgrenzung zwischen unbemannten Luftfahrtsystemen und Flugmodellen ausschließlich über den Zweck der Nutzung: Dient die Nutzung des Geräts dem Zwecke des Sports oder der Freizeitgestaltung, so gelten die Regelungen über Flugmodelle. Ist mit dem Einsatz hingegen ein sonstiger, insbesondere ein gewerblicher Nutzungszweck verbunden, z. B. Bildaufnahmen mit dem Ziel des Verkaufs, so handelt es sich um ein unbemanntes Luftfahrtsystem im Sinne von § 1 Absatz 2 Nummer 9 Luftverkehrsgesetz (LuftVG).

In Deutschland ist der Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen erlaubnispflichtig. Darüber hinaus ist der Betrieb von unbemannten Luftfahrtgeräten außerhalb der Sichtweite des Steuerers oder mit einer Gesamtmasse von über 25 Kilogramm grundsätzlich verboten. Zuständig für die Erteilung einer Erlaubnis sind die Luftfahrtbehörden der Länder. Es kann eine Erlaubnis (so genannte Aufstiegserlaubnis) erteilt werden, wenn die zuständige Luftfahrtbehörde festgestellt hat, dass die beabsichtigte Nutzung des unbemannten Luftfahrtsystems nicht zu einer Gefahr für die Sicherheit des Luftverkehrs oder die öffentliche Sicherheit oder Ordnung führt.

Im Rahmen ihrer Zuständigkeit haben Bund und Länder einheitliche Regelungen für die Harmonisierung des Verwaltungshandelns erarbeitet. Diese „Gemeinsamen Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung

der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen gemäß § 16 Absatz 1 Nummer 7 LuftVO“ wurden in den „Nachrichten für Luftfahrer“ (NfL I 161/12) veröffentlicht. Die folgenden Informationen geben einen kurzen Abriss daraus wieder.

Hinsichtlich der Aufstiegserlaubnis kann eine allgemeine oder eine auf den Einzelfall bezogene Erlaubnis von der Behörde erteilt werden. Allerdings bestimmt dies die zuständige Behörde nach ihrem pflichtgemäßen Ermessen. Wiegt das Fluggerät beispielsweise bis zu 5 kg (inklusive Nutzlast) und hat keinen Verbrennungsmotor als Antrieb, besteht in den meisten Bundesländern die Möglichkeit, dass eine allgemeine Erlaubnis erteilt wird. Diese kann bis zu 2 Jahre Gültigkeit haben. Der Antrag auf Erteilung einer Aufstiegserlaubnis ist schriftlich bei der jeweiligen zuständigen Landesbehörde zu stellen. Dafür können die entsprechenden Antragsformulare auf den Internetseiten der zuständigen Landesbehörde genutzt werden. Die Anerkennung einer bereits nach den „Gemeinsamen Grundsätzen“ erteilten Allgemeinerlaubnis einer anderen Landesluftfahrtbehörde ist möglich (ausgenommen in den Bundesländern Baden-Württemberg, Berlin, Bremen, Hamburg und Rheinland-Pfalz) und kann unter Beifügung einer Kopie dieser Erlaubnis in der Regel formlos beantragt werden. Im Rahmen der Entscheidung über einen beantragten Aufstieg prüft die Luftfahrtbehörde unter anderem auch, ob die einschlägigen datenschutzrechtlichen Bestimmungen beachtet werden. Mit Hilfe des unbemannten Luftfahrtsystems darf nicht in den Bereich der privaten Lebensgestaltung Dritter eingedrungen werden. Dies bedeutet: Wenn bei der Antragsprüfung festgestellt wird, dass Datenschutzvorschriften durch die beabsichtigte Nutzung verletzt werden, wird keine Erlaubnis erteilt. Ebenso muss der Steuerer beim Einsatz des unbemannten Luftfahrtgerätes darauf achten, dass datenschutzrechtliche Bestimmungen, Urheberrechte, Persönlichkeitsrechte u. a. nicht verletzt werden.

Die zentralen Grundregeln beim Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen sind: Betrieb in Sichtweite des Steuerers. Maximale Flughöhe von 100 Metern über Grund. Kein Betrieb über Menschen und Menschenansammlungen. Die Genehmigung zum Aufstieg des unbemannten Luftfahrtsystems wird in einem Bescheid erteilt. Die darin aufgeführten Nebenbestimmungen und Beschränkungen sind einzuhalten. Die wichtigsten Nebenbestimmungen bei einer Allgemeinerlaubnis sind zum Beispiel:

- Für die Vorbereitung des Betriebes sind alle wesentlichen Informationen über die örtlichen Gegebenheiten, die meteorologischen Bedingungen sowie die Luftraumverhältnisse einzuholen.
- Innerhalb geschlossener Ortschaften ist die zuständige Ordnungsbehörde/Polizeidienststelle vorab zu informieren. Innerhalb von naturschutzrechtlichen Schutzgebieten ist die zuständige Naturschutzbehörde vorab zu informieren.
- Der Betrieb von UAS in einer Entfernung von weniger als 1,5 km von der Begrenzung von Flugplätzen sowie auf Flugplätzen bedarf der Zustimmung der Luftaufsicht oder der Flugleitung. Innerhalb eines kontrollierten Luftraums ist vor dem Betrieb des UAS eine Flugverkehrskontrollfreigabe bei der zuständigen Flugverkehrskontrollstelle einzuholen.
- Starts und Landungen bedürfen der Zustimmung des jeweiligen Grundstückseigentümers. Der Start und Landeplatz ist abzusichern.
- Das UAS ist so zu betreiben, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Personen und Sachen, nicht gefährdet oder gestört werden. Es muss ein ausreichender Sicherheitsabstand zu dritten Personen sowie zu öffentlichen Verkehrswegen (darunter fallen z. B. auch Binnenwasserstraßen), Hochspannungsleitungen und anderen Hindernissen eingehalten werden.
- Der UAS darf nur innerhalb der Betriebsgrenzen der Betriebsanleitung bzw. der Gebrauchsanweisung des Herstellers betrieben werden. Ein an den Einsatz angepasstes Notfallverfahren für das Notfallszenario „Funkausfall“ ist festzulegen.
- Der Steuerer muss jederzeit mit Hilfe der Funkfernsteuerung manuell und in Echtzeit eingreifen können.
- Beim Betrieb von UAS ist auf weiteren Flugverkehr zu achten. Das UAS hat bemannten Luftfahrzeugen stets auszuweichen. Im Einsatzraum von Luftfahrzeugen von Polizei und Rettungsdiensten ist der Betrieb nicht erlaubt bzw. umgehend einzustellen.
- Bei Anzeichen von Funkstörungen ist der Flugbetrieb unverzüglich einzustellen und ist solange einzustellen, bis die Störquelle eindeutig ermittelt und ausgeschaltet wurde.
- Der Erlaubnisinhaber hat einen Nachweis über den Einsatz des UAS zu führen (Aufzeichnungen über den jeweiligen Flugbetrieb).
- Unfälle mit Personen- oder schweren Sachschäden sowie sonstige nicht nur geringfügige Störungen im Zusammenhang mit der Ausübung einer Erlaubnis sind der Erlaubnisbehörde unverzüglich anzuzeigen.

Mitteilung aus der Normungsarbeit des DIN

Der DIN-Normungsausschuss NA 005-03-02 Arbeitsausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ hat zwei neue DIN-Vorhaben im Entwurf abgeschlossen und stellt diese den Interessierten Kreisen zur Stellungnahme vor.

Die **DIN 18740-6 „Photogrammetrische Produkte – Teil 6: Anforderungen an digitale Höhenmodelle“** beschäftigt sich mit digitalen Höhenmodellen regionaler, überregionaler, nationaler und internationaler Ausdehnung. Die Norm gilt für die Ableitung von digitalen Höhenmodellen, die auf der Grundlage von flugzeug- bzw. satellitengestützten Erfassungsmethoden hergestellt werden. Die Datenerfassungsmethode für digitale Höhenmodelle ist von der Zielanwendung und somit von den anwendungsspezifischen Genauigkeitsanforderungen und der Punktdichte abhängig. Als geeignete Verfahren für die Gewinnung von Rohdaten zur Ableitung von digitalen Höhenmodellen kommen nach heutigem Stand der Technik die luftbild- und satellitengestützte Photogrammetrie, das Airborne Laserscanning sowie das interferometrische Radar (InSAR) in Betracht. Terrestrische Messverfahren und Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) dienen im Rahmen dieser Norm zur Georeferenzierung, zur Bereitstellung von Kontrolldaten und zur Qualitätsbestimmung. Anforderungen an Sensoren sind nicht Bestandteil dieser Norm.

Die **DIN 18740-7 „Photogrammetrische Produkte – Teil 7: Anforderungen an geometrische Datenfusionsverfahren“** gilt für

Bilddaten optischer Sensoren und legt Anforderungen an die Eingangsdaten und an Verfahren zum Pansharpening (Fusion auf Daten-/Signalebene) fest. Die fusionierten Bilddaten bilden die Grundlage für Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und Kartographie. Zur vielseitigeren Verwendbarkeit von Sensoren und zur Verbesserung der Auswertung ist es zweckmäßig, spektrale Daten eines Sensors oder unterschiedlicher Sensoren miteinander zu verknüpfen (fusionieren). Damit wird eine verbesserte geometrische und spektrale Datengrundlage für eine digitale Weiterverarbeitung erhalten. Prinzipiell ist zwar die Fusion von Daten unterschiedlicher Fernerkundungssensoren möglich, z. B. Radardaten und thermale Daten. Diese Norm bezieht sich aber nur auf die Fusion optischer Fernerkundungsdaten zum Zwecke des Pansharpening.

Den Interessierten Kreisen wird vor der Verabschiedung der Normentwürfe die Möglichkeit der Stellungnahme gegeben. Die Normentwürfe sind im Norm-Entwurfs-Portal des DIN verfügbar (<http://www.entwuerfe.din.de>). Dieser Online-Service bietet Experten auch außerhalb des Arbeitsausschusses im DIN die Möglichkeit, sofort und kostenfrei Inhalte von aktuellen Norm-Entwürfen zu lesen und zu kommentieren. Die Einspruchsfrist endet am 25.2.2014.

SVEN BALTRUSCH, Schwerin

Neuerscheinungen

KUMMER, K., FRANKENBERGER, J. & KÖTTER, T. (Hrsg.) 2014: *Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2014*, 2014. Wichmann-Verlag, 750 Seiten. ISBN 978-3-87907-529-4.

Das Jahrbuch bildet eine Klammer für die in den letzten Jahren ausgeweiteten Bereiche Vermessung und Geoinformation. Es bietet in dieser Form eine Zusammenschau der einzelnen Fachthemen, die bislang nur weit verstreut, d. h. nicht zusammengefasst, in einem Gesamtwerk zu finden waren. Die Ausgabe 2014 widmet sich schwerpunktmäßig den Themen, Stadtentwicklung und Städtebau, Stadterneuerung und Stadtumbau, Flächenmanagement und Bodenordnung, Immobilienmärkte und Grundstückswertermittlung.

BRINKHOFF, T., 2013: *Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis – Einführung in Objektrelationale Geodatenbanken unter besonderer Berücksichtigung von Oracle Spatial*. Wichmann-Verlag, 524 Seiten. ISBN 978-3-87907-513-3.

Dieses Lehrbuch vermittelt die Grundkenntnisse für einen kompetenten Umgang mit Geodatenbanksystemen. Dabei wird neben theoretischen Grundlagen auch die Praxis unter besonderer Berücksichtigung von Oracle Spatial 12 vermittelt. Nach einer Einführung in die Grundprinzipien objektrelationaler (Geo-)Datenbanken werden ISO 19107 Spatial Schema, das Simple-Feature-Modell (ISO 19125) und SQL/MM Spatial als Geodatenmodelle und deren konkrete Umsetzung vorgestellt.

Veranstaltungskalender

2014

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

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

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

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

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

26. – 28. März: **Gemeinsame Tagung DGfK, DGPF, GfGI und GiN 2014 in Hamburg**. geomatik-hamburg.de

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

14. – 16. Mai: **ISPRS Technical Commission IV Symposium 2014 in Suzhou**, China. www2.isprs.org/2014tc4symposium

19. – 21. Mai: **ISPRS Technical Commission VI Symposium 2014 in Wuhan**, China. www.lmars.whu.edu.cn/isprsc06

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6. – 8. Oktober: **ISPRS Technical Commission II Symposium 2014** in Toronto, Kanada.

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

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

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

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

Korporative Mitglieder

Firmen

AEROWEST GmbH
AICON 3D Systems GmbH
aphos Leipzig AG
Becker GeoInfo GmbH
Bernhard Harzer Verlag GmbH
BlackBridge AG
Blom Deutschland GmbH
Brockmann Consult GmbH
bsf swissphoto GmbH
Büro Immekus
CGI Systems GmbH
DB Netz AG
DELPHI IMM GmbH
Deutsches Bergbau-Museum
EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH
Esri Deutschland GmbH
EUROPEAN SPACE IMAGING
Eurosense GmbH
fokus GmbH
g.on experience gmbh
GAF GmbH

GeoCart Herten GmbH
GeoContent GmbH
Geoinform. & Photogr. Engin. Dr. Kruck & Co. GbR
geoplana Ingenieurgesellschaft mbH
GEOSYSTEMS GmbH
GGS - Büro für Geotechnik, Geoinformatik, Service
Hansa Luftbild AG
IGI - Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH
ILV Ingenieurbüro für Luftbilddauswertung und Vermessung
Infoterra GmbH
INVERS - Industrievermessung & Systeme
ITT Visual Information Solutions Germany
J. Linsinger ZT-GmbH
Leica Geosystems GmbH
Luftbilddatenbank-Würzburg
Messbildstelle GmbH
Microsoft Photogrammetry
MILAN Geoservice GmbH
M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH
PHOENICS GmbH
PMS - Photo Mess Systeme AG
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH

RWE Power AG, Geobasisdaten/Markscheidewesen
 technet GmbH
 topometric GmbH
 TRIGIS Vermessung + Geoinformatik GmbH
 Trimble Germany GmbH
 trimetric 3D Service GmbH
 Wichmann, VDE Verlag GmbH
 Z/I Imaging Ltd.

Behörden

Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr
 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft
 und Verbraucherschutz
 Hessisches LA für Bodenmanagement und Geoinfor-
 mation
 Innenministerium NRW, Gruppe Vermessungswesen
 Institut für Umwelt- und Zukunftsforschung
 LA für Geoinformation und Landentwicklung, BW
 LA für Vermessung und Geoinformation, Bayern
 LB Geoinformation und Vermessung, Hamburg
 LB für Küstenschutz, Nationalpark und Meeres-
 schutz, SH
 Landeshauptstadt Düsseldorf, Vermessungs- und
 Liegenschaftsamt
 Landesvermessung und Geobasisinformation Nieder-
 sachsen
 Märkischer Kreis, Vermessungs- und Katasteramt
 Regierungspräsident Tübingen, Abt. 8 Forstdirektion
 Regionalverband Ruhr
 Staatsbetrieb Sachsenforst Pirna
 Stadt Bocholt, Fachbereich 31
 Stadt Köln, Amt für Liegenschaften, Vermessung
 und Kataster
 Stadt Wuppertal, Vermessung, Katasteramt und Geo-
 daten
 Thüringer LA für Vermessung und Geoinformation

Hochschulen

BTU Cottbus, Lehrstuhl für Vermessungskunde
 FH Frankfurt a.M., FB 1, Studiengang Geoinformation

FH Mainz, Institut für Raumbezogene Informations-
 und Messtechnik
 Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photo-
 grammetrie und Geoinformatik
 HCU HafenCity Universität Hamburg, Geomatik
 HfT Stuttgart, Vermessung und Geoinformatik
 HS Bochum, FB Vermessung und Geoinformatik
 HS Karlsruhe, Fakultät für Geomatik
 HTW Dresden, FB Vermessungswesen/Kartographie
 LUH Hannover, Institut für Kartographie und Geoin-
 formatik
 LUH Hannover, Institut für Photogrammetrie und
 Geoinformation
 MLU Halle, FG Geofernerkundung
 Ruhr-Uni Bochum, Geographisches Institut
 RWTH Aachen, Geodätisches Institut
 TU Bergak. Freiberg, Institut für Markscheidewesen
 und Geodäsie
 TU Berlin, Computer Vision & Remote Sensing
 TU Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformati-
 onstechnik
 TU Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photo-
 grammetrie
 TU Clausthal, Institut für Geotechnik und Mark-
 scheidewesen
 TU Darmstadt, Institut für Photogrammetrie und
 Kartographie
 TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fern-
 erkundung
 TU München, FG Photogrammetrie und Fernerkun-
 dung
 TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkun-
 dung
 Uni Bonn, Institut für Photogrammetrie
 Uni Göttingen, Institut für Waldinventur und Wald-
 wachstum
 Uni Heidelberg, IWR Interdisziplinäres Zentrum für
 Wissenschaftliches Rechnen
 Uni Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften
 Uni Kiel, Geographisches Institut
 Uni Stuttgart, Institut für Photogrammetrie
 Uni Würzburg, Geographisches Institut
 Uni zu Köln, Geographisches Institut

Korrigendum zu PFG 6/2013

Sehr geehrte Leser der PFG,

Auf Seite 629 der o. g. Ausgabe wurden die 3 neuen Mitglieder der DGPF

- Dipl.-Geogr. STEVEN BAYER, Berlin
- Dipl.-Ing. WOLFGANG BRANDENBURGER, München
- B.Sc. THOMAS DARR, Deisenhofen

versehentlich in der Rubrik „Ehrenmitglieder der DGPF“ genannt anstatt in der Rubrik „Neue Mitglieder der DGPF“.

Zu den Ehrenmitgliedern der DGPF gehören ausschließlich

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

Bitte entschuldigen Sie das Versehen.

Schweizerbart Science Publishers



Die Jade Hochschule liegt ganz oben im Nordwesten:
In Wilhelmshaven, Oldenburg und Elsfleth studieren derzeit rund 7000 junge Menschen, die Lust auf Zukunft haben. 180 Professorinnen und Professoren betreuen sie dabei persönlich und individuell. Die Jade Hochschule fördert eigenverantwortliches und praxisorientiertes Lernen, kritisches Denken und die Entwicklung unkonventioneller Lösungen. Akademische Ausbildung verbindet sie mit dem Erwerb von Schlüsselqualifikationen und ethischer Kompetenz. Die Hochschule engagiert sich aktiv für Chancengleichheit.

Professur (BesGr. W2) für das Gebiet Ingenieurvermessung und industrielle Messtechnik

(Kennziffer BG14-PG1)

An der **Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth** ist im **Fachbereich Bauwesen und Geoinformation** am **Studienort Oldenburg** zum nächstmöglichen Zeitpunkt vorgenannte Stelle zu besetzen.

Die Stelleninhaberin oder der Stelleninhaber soll Lehrveranstaltungen aus dem Gebiet der Ingenieurvermessung, des Laserscannings und der industriellen Messtechnik gestalten und durchführen. Dabei sollen hauptsächlich Module in den Bachelor-Studiengängen „Angewandte Geodäsie“ und „Geoinformatik“ und im Master-Studiengang „Geodäsie und Geoinformatik“ angeboten werden. Daneben wird die Fähigkeit und Bereitschaft erwartet, Grundlagenfächer in diesen und in den übrigen Bachelor- und Master-Studiengängen des Fachbereichs Bauwesen und Geoinformation zu übernehmen sowie an der akademischen Selbstverwaltung aktiv mitzuwirken. Die Forschungsinteressen sollen durch Projekte und Technologietransfer in die Arbeit der Hochschulinstitute eingebracht werden.

Gute englische Sprachkenntnisse und die Bereitschaft, Vorlesungen in englischer Sprache zu halten, sind Voraussetzung.

Die Hochschule erwartet als Bewerberinnen und Bewerber Fachleute mit Hochschulabschluss in den Bereichen Geodäsie, Vermessungswesen oder in anderen technisch-naturwissenschaftlichen Bereichen mit einschlägiger Berufspraxis in Ingenieurvermessung, industrieller Messtechnik oder Laserscanning.

Es wird erwartet, dass die Stelleninhaberin oder der Stelleninhaber den Lebensmittelpunkt in die Region Oldenburg verlegt.

Die Einstellungsbedingungen ergeben sich aus § 25 des Niedersächsischen Hochschulgesetzes (NHG). Ein Merkblatt kann im Internet unter www.jade-hs.de/stellen eingesehen werden oder von der Personalabteilung unter der Tel.-Nr. 04421 985-2975 angefordert werden.



Die Jade Hochschule tritt für die Geschlechtergerechtigkeit und die personelle Vielfalt in der Wissenschaft ein und hat sich das strategische Ziel gesetzt, den Anteil von Frauen in Forschung und Lehre deutlich zu erhöhen.

Entsprechend freuen wir uns über Bewerbungen qualifizierter Frauen. Das Büro der Gleichstellungsbeauftragten, Tel.-Nr. 0441 7708-3226, gibt auf Anfrage weitere Auskünfte.

Die Bewerbungen Schwerbehinderter werden bei gleicher Eignung und Qualifikation bevorzugt berücksichtigt.

Richten Sie Ihre Bewerbung bitte mit den üblichen Unterlagen unter Angabe der Kennziffer bis zum 28.02.2014 an den


JADE HOCHSCHULE
Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

Präsidenten
der Jade Hochschule
Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth

Dr. habil. Elmar Schreiber
Friedrich-Paffrath-Straße 101
26389 Wilhelmshaven
www.jade-hs.de

