

Heft 101

Neubiberg, 2024

---

Wolfgang Reinhardt, Hai Huang [Hrsg.]

Festschrift für  
Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer  
zum 60. Geburtstag

SCHRIFTENREIHE

---



INSTITUT FÜR GEODÄSIE

*der Bundeswehr*  
*Universität*  *München*

Der Druck dieses Heftes wurde aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München gefördert.

Auflagenhöhe: 50

Hergestellt an der Professur für Visual Computing des Instituts für Angewandte Informatik der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg von:

*Dott. Mag. Valentina Bonomo*  
*PD Dr.-Ing. Hai Huang*

Herausgeber der Schriftenreihe:

*Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg*

**Bezugsnachweis:**

**Universität der Bundeswehr München**  
**Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften**  
**Institut für Geodäsie**  
**D - 85577 Neubiberg**

ISSN 0173 – 1009

<https://www.unibw.de/geodaesie/schriftenreihe>

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	1
<i>REINHARDT, Wolfgang</i> Prof. Dr.-Ing. Helmut Meyer .....	3
<i>FORBERG, Andrea</i> Ode an den Doktorvater .....	9

## Fachbeiträge

<i>BACHER, Uwe</i> Moderne Luftbildphotogrammetrie in der Praxis .....	11
<i>DRAUSCHKE, Martin</i> Erinnerungen an meine Zusammenarbeit mit Helmut Mayer und das Projekt „3D-Modelle für Urbane Operationen“ .....	19
<i>EISSFELLER, Bernd</i> Global Navigation Satellite Systems (GNSS): The Utmost Interdisciplinary Integrator .....	27
<i>HEIPKE, Christian; SCHÖN, Steffen</i> Studying Geodesy and Geoinformatics – a German university perspective .....	35
<i>HELLWICH, Olaf et al.</i> Tracking Mouse from Incomplete Body-Part Observations and Deep-Learned Deformable-Mouse Model Motion-Track Constraint for Behavior Analysis .....	45
<i>HEUNECKE, Otto</i> Gerätetechnische Entwicklungen im Geodätischen Labor der UniBw München .....	53
<i>KISSNER, Michael</i> On AI Grey Boxes, Security of Chip Design and Backdoors .....	65
<i>LANG, Nico; WEGNER, Jan D.; SCHINDLER, Konrad</i> High Carbon Stock Mapping at Large Scale to Guide Forest Conservation in Tropical Southeast Asia .....	73
<i>LECHNER, Ulrike et al.</i> Scary – Die Ransomware meldet sich .....	89

<i>RAHMANI, Kujtim</i>	
Using Semantic Segmentation for 3D Reconstruction and Vice-versa .....	95
<i>REZNIK, Sergej</i>	
Erinnerungen an meine Zusammenarbeit mit Helmut Mayer und das Projekt "Abstraktion von Geoinformation für die multiskalige Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung" .....	103
<i>SCHMITT, Michael</i>	
Photogrammetrie & Fernerkundung, Visual Computing und Erdbeobachtung – eine Disziplin im Wandel der Zeit .....	107
<i>THIEMANN, Karl-Heinz</i>	
Einziehung von Rezess- und Flurbereinigungswegen .....	113
<i>ULRICH, Markus; URBAN, Steffen.; HINZ, Stefan</i>	
Integrating Photogrammetry and Machine Vision – Two Examples of Using Best of Both Worlds .....	125
Publikationsliste Prof. Helmut Mayer .....	139

## **Anhang**

Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München

# Vorwort

Diese Festschrift ist aus Anlass des 60. Geburtstages von Herrn Professor Dr.-Ing. HELMUT MAYER entstanden.

Sie enthält 16 Beiträge von 38 Autoren, Kollegen, Freunden und Mitarbeitern, die ihn ein Stück auf seinem wissenschaftlichen Weg begleitet haben – meist verbunden durch das gemeinsame Interesse am Fachgebiet in seinen verschiedenen Ausprägungen.

Die ersten beiden Beiträge würdigen Leben, Werk und Persönlichkeit des Jubilars. Die folgenden sind Fachaufsätze, vorzugsweise aus dem Bereich des Fachgebiets des Autors bzw. von diesem naheliegenden.

Allen, die diesen Band durch einen schriftlichen Beitrag möglich gemacht haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt, den Autoren sowie Frau Dott. Mag. Valentina Bonomo, Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Liebl und weiteren Mitarbeitern des Instituts für Geodäsie, ohne die das Erscheinen in der „*Grünen Reihe*“ – vormals Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, dem HELMUT MAYER von 1999 bis Ende 2007 angehörte, nunmehr herausgegeben als Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie – nicht möglich gewesen wäre.

Neubiberg, im Oktober 2024

*Wolfgang Reinhardt und Hai Huang*



## Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer

Die Photogrammetrie, das „ursprüngliche“ Fachgebiet von Helmut Mayer, hat in den letzten drei bis vier Jahrzehnten – also ungefähr dem Zeitraum, in dem er sich mit der Thematik beschäftigt – einen enormen Wandel durchlaufen. Ende der 80er Jahre – also der Zeit seiner Studienjahre – an vielen Stellen noch von analogen Geräten und Auswertungen dominiert - aber dann in den folgenden Jahren immer stärker durch die analytische Photogrammetrie verdrängt, und damit auf dem Weg in die digitale Photogrammetrie. Es dauerte dann aber bis in die 2010er Jahre bis ein durchgehender digitaler Datenfluss von der Aufnahme bis zu den Endprodukten etabliert war. Diese Entwicklung wird vor allem im ersten Fachbeitrag ausführlich dargestellt. An dieser Stelle soll daher nur auf einige, HELMUT MAYER betreffende Punkte, Bezug genommen werden.



Prof. Helmut Mayer

Seit 1. Juni 1999 war er ordentlicher Professor für Photogrammetrie und Fernerkundung im Studiengang Geodäsie der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen an der Universität der Bundeswehr München. Nach Einstellung des Studienganges Geodäsie wechselte Professor MAYER 2008 zusammen mit dem Autor dieser Zeilen in die Fakultät Informatik, und ist seitdem Mitglied des Institutes

für Angewandte Informatik. Seine Arbeiten waren von Anfang an in der digitalen Photogrammetrie an vorderster Front der Forschung verankert und von Methoden bzw. Vorgehensweisen der Informatik geprägt. Dies wurde nach dem Wechsel in die Informatik dann konsequent umgesetzt in dem die Professur in VISUAL COMPUTING umgewidmet wurde.

HELMUT MAYER wurde 1964 in Memmingen geboren und verbrachte seine Grundschulzeit in Memmingerberg und besuchte das Gymnasium in Memmingen, wo er das Abitur ablegte. Nach der Wehrdienstzeit studierte er von 1985-1990 Vermessungswesens an der Technischen Universität (TU) München mit Vertiefung Photogrammetrie und Kartographie. Im März 1990 legt er die Prüfung zum Diplom Ingenieur mit Auszeichnung ab und erhielt dafür den Spindler-Preis für die beste Studienleistung bei kurzer Studiendauer der Absolventen des Vermessungswesens an der TU München in den Jahren 1989 und 1990.

Von 1990-1993 erhielt er ein Promotionsstipendium der Siemens AG in Zusammenarbeit zwischen SICAD, Siemens Zentraler Forschungs- und Entwicklungsabteilung und dem Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München (Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. HEINRICH EBNER). 1994 wurde das Ergebnis der Arbeiten dieses Promotionsstipendiums, seine Dissertation, betreut von HEINRICH EBNER, unter dem Titel „Automatische wissensbasierte Extraktion von semantischer Information aus gescannten Karten“ veröffentlicht. Als persönliche Notiz möchte ich hier anfügen, dass ich HELMUT MAYER kurz nach Beginn seines Promotionsstipendiums kennengelernt habe, da ich damals im Bereich Geoinformationssysteme (SICAD) bei Siemens Nixdorf tätig war, und schon damals von seiner Zielorientierung, seiner Präzision und seinem Ideenreichtum, also von seiner wissenschaftlichen Arbeitsweise beeindruckt war. Es hat mich nicht überrascht, dass er schon ca. 5 Jahre nach seiner Promotion die bereits genannte Professur antreten konnte. Am 1. August 1993 wurde er dann zum Wissenschaftlichen Assistent am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München (Leitung: Prof. HEINRICH EBNER) ernannt. HELMUT MAYERS Arbeiten ebneten den Weg für den Einstieg des Lehrstuhls in das Thema “Bildverstehen”, so daß in den folgenden Jahren nicht nur bei seinen Arbeiten, sondern auch bei einer

bald gebildeten Arbeitsgruppe, das Thema „automatische Objektextraktion aus Luftbildern“ im Vordergrund stand, wobei Aspekte wie die semantische Modellierung und die Erkennung von linienhaften Strukturen, beispielsweise Straßen, eine wichtige Rolle spielten. Die erzielten Ergebnisse wurden viel beachtet und die Verfahren waren bei internationalen Vergleichsauswertungen sehr erfolgreich. Insgesamt wurde das genannte Thema wissenschaftlich, aber auch in Richtung einer Praxisreife, sehr stark vorangetrieben. Diese Erfolge wurden zum einen begünstigt durch eine fruchtbare Kooperation mit dem Lehrstuhl von Prof. Radig (Fakultät für Informatik, TUM) aber auch durch die mit sehr talentierten Wissenschaftlern besetzte Arbeitsgruppe. Dies zeigt sich auch dadurch, dass aus der Gruppe neben HELMUT MAYER auch CHRISTIAN HEIPKE, OLAF HELLWICH, und STEFAN HINZ auf renommierte Lehrstühle berufen wurden.



Prof. Mayer auf Konferenzreise

Helmut Mayer fertigte in dieser Zeit neben einer Vielzahl von Publikationen auch seine Habilitationsschrift mit dem Titel „Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern“ an und am 9. November 1998 wurde ihm die Lehrbefugnis für das Fachgebiet Photogrammetrie erteilt, verbunden mit der Führung des Titels Privatdozent. Im gleichen Jahr wurde er auch zum Oberassistent am genannten Lehrstuhl ernannt.

Eine ganz besondere Ehrung wurde ihm im Jahr 2000 zuteil, er erhielt den Otto von Gruber Preis der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS). Der Preis wird alle vier Jahre an einen jünger als vierzig Jahre alten Autor einer Publikation von herausragender Bedeutung für Photogrammetrie, Photointerpretation oder Fernerkundung verliehen, und stellt eine der wichtigsten Auszeichnungen in dem Bereich dar!

Selbstredend werden einem erfolgreichen Wissenschaftler wie Helmut Mayer auch vielfach Positionen in Gremien angetragen. Hierzu einige Beispiele:

In der ISPRS war er von 2004-2008 Vice President der Commission III “Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis”. Daneben hatte er seit 1997 die Leitung (Chair) verschiedener Working Groups:

- 1997-2000: III/3 Feature Extraction and Grouping
- 2000-2004: III/4 Automated Object Extraction
- 2008-2012: III/1 Pose Estimation and Surface Reconstruction from Image and/or Range Data
- 2012-2016: III/1 Orientation and Surface Reconstruction

In der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) fungierte er von 2007 bis 2011 als Hauptschriftleiter der Zeitschrift „Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation“ (PFG) und als Mitglied des Vorstands.

Von 2009 bis 2018 war er Mitglied und von 2016 bis 2018 Sprecher des Technischen Komitees der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung (DAGM).

Seit 2001 ist er ordentliches Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) und seit 2019 stellvertretender Sprecher der Abteilung Geoinformatik.

Auch in Hochschulgremien engagierte er sich durchgehend, sowohl in der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen (BauV) als auch nach dem Wechsel in der Fakultät für Informatik. Beispielsweise war er von 2000-2002 Prodekan der Fakultät BauV und in beiden



Studiengängen mehrfach Mitglied von Gremien wie dem Fachbereichsrat.

Seine aktuellen Forschungsschwerpunkte können wie folgt zusammengefasst werden:

- Objektextraktion aus Luftbildern und terrestrischen Bildern
- Statistische Modellierung für Objektextraktion
- Direkte Orientierung und dichte 3D Rekonstruktion
- Objektdetektion in höchstauflösenden Satellitenbildern

Zu betonen ist hierbei, daß HELMUT MAYER seit seiner Berufung auf die Professur eine große Zahl von Forschungsprojekten, oft mit internen und/oder externen Partnern, erfolgreich durchgeführt hat. In der Mehrheit handelt es sich um eingeworbene Drittmittelprojekte, die grundlagenorientiert sind, aber zum großen Teil auch einen starken Bezug zu praktischen Fragestellungen haben. Als Mittelgeber sind Einrichtungen der deutschen Forschungsförderung, vor allem die DFG, und Großforschungseinrichtungen wie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zu nennen. Einen großen Anteil haben aber auch Organisationen des Trägers der UniBw, wie beispielsweise das Amt für militärisches Geowesen bzw. das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (siehe Beitrag DRAUSCHKE).

Weitere Informationen hierzu finden sich unter:

<https://www.unibw.de/visual-computing/lehre-forschung/forschung/wissenschaftliche-arbeitsschwerpunkte> und

<https://www.unibw.de/visual-computing/lehre-forschung/forschung/forschungsprojekte-aus-mitteln-dritter>

Die Publikationsliste von HELMUT MAYER umfasst mehr als 200 Einträge und ist am Ende dieses Bandes enthalten.

Die Fachbeiträge von MARTIN DRAUSCHKE, KUJTIM RAHMANI, SERGEJ REZNIK und MICHAEL SCHMITT in diesem Band geben ebenfalls vertiefte Einblicke in seine Forschungsarbeiten und/oder berichten über ausgewählte Projekte.

Bisher entstanden 14 Dissertationen unter seiner Anleitung (s. <https://www.unibw.de/visual-computing/lehre-forschung/forschung/dissertationen>) und weitere sind in Arbeit!

Die Lehre nimmt einen hohen Stellenwert bei HELMUT MAYER ein, so betreute er eine Vielzahl von Seminar-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten etc. in beiden bereits genannten Fakultäten bei denen die Studierenden einen sehr guten Einblick in <sup>1</sup>seine hochkarätige Forschung erhielten. Ein Überblick über die aktuellen Lehrveranstaltungen findet sich unter: <https://www.unibw.de/visual-computing/lehre-forschung/lehre/uebersicht-der-lehrveranstaltungen>.

Zum Abschluß dieser Zeilen möchte ich meinem geschätzten Kollegen HELMUT MAYER herzlichst zu seinem 60. Geburtstag und seinen herausragenden Beiträgen zur Entwicklung seines Fachgebietes gratulieren, verbunden mit dem Dank für die langjährige sehr gute Zusammenarbeit im Institut für Angewandte Informatik. Möge ihm seine Schaffenskraft bei bester Gesundheit noch lange erhalten bleiben!

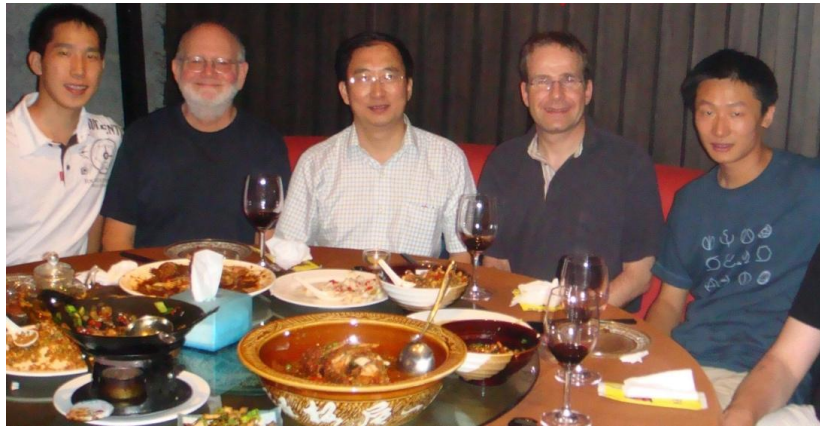
Prof. Dr.-Ing Wolfgang Reinhardt (I.R.)

Neubiberg im September 2024

---

1 Alle Internetressourcen wurden im September 2024 zuletzt besucht.

## Prof. Mayer in Bildern



Treffen mit chinesischen Wissenschaftlern beim ISPRS Kongress 2008 in Beijing



Im Kreis von Kollegen im Rahmen des ISPRS-Kongress 2008



Kickoffmeeting, Projekt mit Amt für mil. Geowesen (Bei DLR, Oberpfaffenhofe)

## Ausgewählte Promotionen



Promotion Uwe Bacher



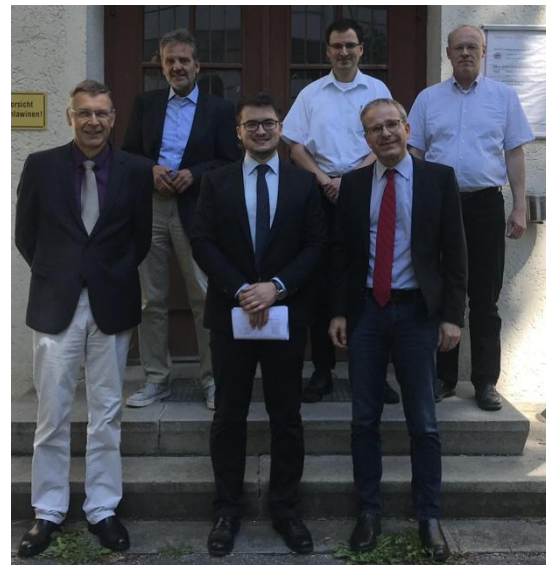
Promotion Hai Huang



Promotion William Nguatem (mit „Corona-Abstand“)



Promotion Mario Michelini



Promotion Michael Kissner



Andrea Forberg

## Ode an den Doktorvater

Gedicht für Prof. Dr. Helmut Mayer anlässlich seines Ehrentages

---

### Ode an Helmut

Es war einmal in Neubiberg.  
Da machte ich mich frisch ans Werk.  
Die Doktorarbeit war mein Ziel.  
Am Anfang wusste ich nicht viel.

Ja, Helmut gab mir die Grundlage  
für die dann anschließende Frage,  
was ich fortan erforschen sollte,  
worin ich promovieren wollte.

3D Gebäude im Maßstabsraum!  
Sie zu mutieren war mein Traum.  
Mit kaum Detail oder mit viel,  
es sollt sich wandeln, wie ich's will.

Die Paper-Vielzahl die ich las,  
in für mich bisher neuem Maß,  
gab Einblicke zur State-of-Art  
und meine Arbeit kam in Fahrt.

Ideen fanden ihren Weg  
und ich genoss das Privileg,  
dass Helmut mir den Rücken frei hielt.  
So hab' ich vieles durchgespielt.

Ich konnte eigene Papers schreiben,  
ließ mich zu Konferenzen treiben.  
Die gab es an so mancher Stätte,  
die ich sonst nie gesehen hätte.

Wenn auch der Zweifel mich mal traf,  
wusste ich jederzeit, ich darf  
mit Helmut drüber diskutieren,  
so kroch ich nie auf allen Vieren,

und schrieb die Doktorarbeit munter,  
mit Helmut's Feedback schließlich runter.  
Dies war nun mein Karrierestarter.  
Ein Dank an meinen Doktorvater!

**Anschrift des Verfassers:**  
Dr.-Ing. Andrea Forberg  
E-Mail: forberg.andrea@gmx.de



# Moderne Luftbildphotogrammetrie in der Praxis

## Zusammenfassung

Die Luftbildphotogrammetrie hat sich in den letzten 25 Jahren von einer analogen/analytischen zu einer vollständig digitalen Technologie weiterentwickelt. Diese Transformation ermöglicht die Bereitstellung hochpräziser räumlicher Daten, die für die Erstellung digitaler Zwillinge und die Entscheidungsfindung in Bereichen wie Urbanisierung, Klimawandel und Energieerzeugung unerlässlich sind. Die moderne Luftbildphotogrammetrie umfasst fortschrittliche Technologien wie Laserscanning und digitale Luftbildkameras, die eine effiziente Erfassung und Verarbeitung von räumlichen Grundlagendaten ermöglichen. Wichtige Entwicklungen im Bereich der Luftbildphotogrammetrie umfassen die Einführung von hybriden Sensorsystemen, die sowohl bildgebende als auch Laserscanner-Technologien kombinieren. Trends zeigen eine zunehmende Detailgenauigkeit, häufigere Wiederholungen von Befliegungen, die Erfassung größerer Gebiete und die Integration von Multisensor-Systemen. Die Luftbildphotogrammetrie spielt eine Schlüsselrolle bei der Bereitstellung von Geodaten, die für die Erstellung räumlicher digitaler Zwillinge und die Ableitung neuer Produkte und Lösungen unerlässlich sind.

## Abstract

Over the past 25 years, aerial photogrammetry has evolved from an analog/analytical to a fully digital technology. This transformation enables the provision of highly precise spatial data, which is essential for the creation of digital twins and decision-making in areas such as urbanization, climate change, and energy production. Modern aerial photogrammetry encompasses advanced technologies such as laser scanning and digital aerial cameras, which allow for efficient capture and processing of foundational geospatial data. Significant developments in the field include the introduction of hybrid sensor systems that combine both imaging and laser scanning technologies. Trends indicate increasing detail accuracy, more frequent flight repetitions, the capture of larger areas, and the integration of multisensor systems. Aerial photogrammetry plays a crucial role in providing geospatial data that is indispensable for creating spatial digital twins and deriving new products and solutions.

## 1 Einleitung

Die Luftbildphotogrammetrie stellt eine der wichtigsten Quellen für die Bereitstellung von räumlichen Grundlagendaten dar, in der öffentlichen Wahrnehmung führt die Technologie hingegen ein Schattendasein und wird häufig, wie bei Google Maps, mit Satellitendaten gleichgesetzt. Betrachtet man die Entwicklungen, die sich in diesem Bereich in den letzten rund 25 Jahren vollzogen haben, sieht man ein beeindruckendes Beispiel, wie sich eine Technologie aus der analogen Welt vollständig zum digitalen hin gewandelt hat. Im Zuge der immer schnelleren Veränderungen in der Gesellschaft, sei es durch die Urbanisierung, den Klimawandel oder der Dekarbonisierung der Energieerzeugung, wird es immer wichtiger Prozesse zu simulieren und für die Entscheidungsfindung digitale Abbilder oder Zwillinge zu nutzen. Grundlage aller räumlichen digitalen Zwillinge, sei es für Gemeinden, Städte,

Länder oder ganze Kontinente sind aktuelle Geodaten die in der geforderten Qualität nur von der Luftbild(Laser)vermessung zur Verfügung gestellt werden können. Die Weiterentwicklung der Technologie muss diesen Herausforderungen durch die Evolution der Sensorik, sowie der Optimierung der Prozessketten Rechnung tragen. Ziel muss es sein den handelnden Personen die Daten aus den modernen Sensoren in aufbereiteter Form zur Verfügung zu stellen, damit daraus die richtigen Schlüsse gezogen werden können.

## 2 Moderne Luftbildphotogrammetrie

Die moderne Luftbildphotogrammetrie hat sich in den letzten Jahrzehnten rasant entwickelt. In den 1990er Jahren wurde die analytische Photogrammetrie teilweise digitalisiert. Die nach wie vor analogen Luftbilder konnten mit speziellen hochgenauen und hochauflösenden Scannern digitalisiert werden und dann in den ersten digitalen

photogrammetrischen Arbeitsstationen digital weiterverarbeitet werden. Zusätzlich trat eine neue Technologie auf den Plan, das Laserscanning. Hiermit konnten ebenfalls in den späten 1990er Jahren erstmals direkt Höhendaten größerer Gebiete erfasst werden.

Die Verarbeitungsmöglichkeiten der erfassten Daten wurde durch die Entwicklung performanter Computersysteme deutlich verbessert und mittels GPS konnte erstmals in nahezu Echtzeit positioniert werden und ermöglichte so die direkte Orientierung der erfassten Luftbilder.

Der letzte Schritt hin zu einer vollständigen Digitalisierung der Luftbildphotogrammetrie erfolgte im Jahr 2000 als sowohl Leica als auch Zeiss-Intergraph mit der ADS40 und der DMC-1 die ersten digitalen Luftbildkameras auf dem ISPRS Kongress in Amsterdam vorstellten. Hinzu kam dann im Jahr 2003 das erste digitale Luftbildsystem der Firma Vexcel, die UltraCam-D. Die drei genannten Firmen verfolgten bei der Entwicklung ihrer digitalen Luftbildkameras unterschiedliche Vorgehensweisen. Die Leica ADS war als Zeilenscanner nach dem Drei-Zeilen Prinzip konzipiert, die Zeiss-Intergraph DMC verwendete 4 Einzelkameras, die zusammen zu einem größeren Luftbild vereint wurden und Vexcels UltraCam nutzte das „syntopic“ imaging Konzept, um ebenfalls aus 4 Einzelkameras und 9 Teilbildern ein großes Luftbild zu erzeugen. Zeiss - Intergraph und Vexcel blieben mit Ihrem System dem Prinzip des Flächenhaften Luftbildes, wie in der analogen Photogrammetrie, treu, Leica hingegen ging mit dem 3-Zeilen Pushbroom Prinzip einen neuen Weg (Cramer, 2006; Leberl, 2012; Tempelmann et al., 2000).

Ein wichtiger Schritt in Richtung Demokratisierung der Luftbildphotogrammetrie erfolgte mit dem Aufkommen von kostengünstigen und leicht zu beherrschenden Drohnen als Plattform für die Kameras. Damit entstand in den 2010er Jahren eine neue Klasse der Luftbilderfassung. Die Flughöhen sind in der Regel durch die Regulierung auf Höhen um die 100 m begrenzt und die Reichweite durch die geforderte Sichtverbindung und begrenzte Flugzeit auf einige 100 m beschränkt. Diese neue Klasse eignet sich hervorragend zur Erfassung kleinerer Gebiete von bis zu wenigen km<sup>2</sup>. Durch immer besser werdenden leichte Kamerasysteme können die Drohnen basierten Daten durchaus mit denen der „klassischen“ Luftbildvermessung mithalten.

Angetrieben durch den deutlich größeren Markt entwickelte sich ebenfalls aus dem Markt der Drohnen in Verbindung mit den in der Computer

Vision entwickelten Algorithmik (SIFT (Scale-invariant feature transform bzw. skaleninvariante Merkmalstransformation) (Lowe, D. G., 2004) oder SURF (Speeded Up Robust Features, frei übersetzt: Beschleunigte, robuste Merkmale) neue Ansätze für die Verarbeitung von Luftbilddaten. Mit diesen neuen Verfahren, speziell für die effiziente und robuste Bestimmung von Verknüpfungspunkten, konnten neue Bildkonfigurationen gemeinsam verarbeitet werden und die Begrenzung auf den Normalfall der Photogrammetrie war nicht länger gegeben.

Im Bereich der Flugzeug getragenen Kamerasensoren wurde neben den großformatigen Flächensensoren, neue Konfigurationen entwickelt, die speziell für den Einsatz im Urbanen Bereich optimiert sind, die Oblique oder Schrägluftbildsysteme. Hier sind in der Regel vier Schräg (meist zwischen 35 und 45 Grad) eingebaute Kameras mit einer Nadir blickenden Kamera in einer sogenannten Malteserkreuz Anordnung kombiniert. Der Einsatzzweck dieser neuer Sensorkonfiguration war die kombinierte Erfassung von Nadir Aufnahmen und Schrägansichten, speziell von bebauten Gebieten für die Erzeugung von 3D Stadtmodellen. Alle relevanten Sensorhersteller (Leica Geosystems, Vexcel, IGI oder PhaseOne) sind diesem „Trend“ gefolgt und haben entsprechende Systeme auf den Markt gebracht.

Im Bereich der Flächensensoren war die Entwicklung davon geprägt die Bildsensoren größer zu machen und gleichzeitig die Zeiten zwischen aufeinanderfolgenden Bildern (Cycle Time) zu verringern, um immer effizienter Bilddaten erfassen zu können. Parallel entstand eine neue Sensorklasse für die Erfassung von sehr großen Gebieten, bei denen die Optimierung darauf gerichtet war, möglichst viele Bildelemente quer zur Flugrichtung erfassen zu können, oft zum Preis eines schlechteren Basis/Höhenverhältnisses, der Leica Geosystems ContentMapper oder die Vexcel UltraCam Condor, sind Beispiele für diese Sensorklasse die meist für die reine Orthophotoproduktion im Rahmen von Contentprogrammen eingesetzt werden.

Ein weiterer wichtiger Meilenstein in der Evolution der modernen digitalen Luftbildphotogrammetrie war die Entwicklung des Semi-Global-Matchings (SGM) durch Hirschmüller im Jahr 2005 (Hirschmüller, 2005). Damit verbesserte sich die Qualität der aus Bilddaten abgeleiteten Höhendaten hin zu pixelgenauen 3D Punktwolken, für Oberflächenbereiche nahezu vergleichbar mit den Ergebnissen von Laserscanning. Der SGM-Ansatz



wurde schnell adaptiert und weiterentwickelt und stellt inzwischen den Standard für die DOM-Generierung in nahezu allen Photogrammetrischen Lösungen dar.

Parallel zur Entwicklung im Bereich der Bildbasierten Vermessung aus der Luft erfolgte seit den 1990 Jahren die Entwicklung von Flugzeuggetragenen Laserscannern. Angefangen mit Scannern mit Scannraten im Bereich einiger Tausend Punkte pro Sekunde und eingeschränkter Mehr-Echo-Fähigkeit, entwickelten sich die Systeme bis zu Hochleistungsscannern mit Scannraten von über 2 Mio. Punkten pro Sekunde und einer Aufteilung von mehr als 15 Echos pro Puls. Parallel erfolgten spezielle Entwicklungen im Bereich der Lasertechnologie, wie der Single Photon-Laserscanner oder der Geiger-Mode Laserscanner, die mit sehr hoher Effizienz für die Erfassung großer Gebiete mit großen Punktdichten eingesetzt werden können. Die Flugzeug gestützten Laserscanner wurden somit zu einer perfekten Ergänzung der traditionellen Luftbildphotogrammetrie.

Gab es zu Beginn der Entwicklung der Laserscanner Technologie noch eine starke Konkurrenz zwischen den beiden Herangehensweisen, so hat sich inzwischen mehr und mehr die Überzeugung durchgesetzt, dass die komplementären Technologien zusammen die perfekte Ergänzung darstellen. Nur konsequent war damit auch die Entwicklung und Vorstellung des ersten hybriden Luftbildsystems, bestehend aus Laserscanner und Kamerasystem in einem Sensor, durch Leica Geosystems im Jahr 2016 mit dem CityMapper.

### 3 Trends

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Entwicklungen in der Luftbildphotogrammetrie führten und führen auch zu spürbaren Veränderungen im Bereich der gesamten Industrie der luftgestützten Vermessung. In 6 Bereichen sind seit geraumer Zeit Veränderungen zu sehen, die sich fortsetzen oder sogar verstärken werden (Abbildung 1):

1. Mehr Details – die Auflösungen von Bildflügen werden weiter steigen. Großräumige Befliegungen werden mit Auflösungen von 10 cm oder besser durchgeführt werden. Für städtische Bereiche wird sich der GSD von 5 cm als eine Art Standard etablieren. LiDAR Missionen werden mit mindestens 10 pt/m<sup>2</sup> oder deutlich mehr erfolgen, erste Trends zeigen sogar den Bedarf an LiDAR Daten mit mehr als 40 pt/m<sup>2</sup>.

2. Häufigere Wiederholungen und schnelle Lieferung – Für großräumige Befliegungen werden die Zyklen auf 1 bis 2 Jahre verkürzt werden. Bei der Erfassung von Städten ist ein Trend zu jährlichen oder sogar noch häufigeren Befliegungen zu sehen. Die Bedeutung von LiDAR Daten steigt und auch hier sieht man den Bedarf nach kürzeren Wiederholzyklen in Bereichen von 2 bis 3 Jahren. Für eine zeitnahe Nutzung der Daten ist es darüber hinaus von entscheidender Bedeutung, die Ergebnisse der Befliegung schnell verfügbar zu machen. Die Zeiten von der Befliegung bis zur finalen Lieferung werden immer kürzer und liegen selbst für große Projekte teilweise im Bereich von 30 – 90 Tagen.

3. Größere Gebiete – die Projektgrößen für Befliegungsprojekte werden zusehends größer und es ist ein Trend zur schnellen und einheitlichen Erfassung ganzer Länder zu sehen. Das gilt sowohl für LiDAR als auch für Luftbildbefliegungen.

4. Multisensor – bis vor kurzem gab es eine strikte Trennung zwischen Bild- und LiDAR Befliegungen. Das hat sich, auch durch die Entwicklung neuer hybrider Sensoren, inzwischen verändert. Immer häufiger ist der Bedarf zur simultanen Erfassung der komplementären Bild und LiDAR Daten zu sehen. Dieser Trend wird sich in Zukunft fortsetzen und sicher auch noch verstärken.

5. Mehr KI – die KI ist aus vielen Bereichen schon heute nicht mehr wegzudenken. Bisher sind die Anwendungen im Bereich der Luftgestützten Vermessung noch überschaubar und beschränken sich in erster Linie auf die Auswerteseite, wie Bildanalyse oder die Klassifikation von Punktwolken. In den genannten Bereichen werden wir weitere Verbesserungen und Implementierungen sehen. Es werden aber auch viele neue Bereiche hinzukommen. Die KI wird in Zukunft auch eine stärkere Rolle bei der Optimierung der Flugplanung, der automatischen Qualitätskontrolle oder bei der Ableitung neuer Produkte eine große Rolle spielen.

6. Mehrwert – Wir werden in Zukunft sehen, dass die Erstellung der klassischen Produkte der Luftbildvermessung nicht mehr ausreichen werden. Die Kunden werden mehr und mehr fertige Lösungen und die direkte Gewinnung von Informationen fordern. Auch sind End-to-End Lösungen immer stärker auf dem Vormarsch, nicht mehr die Basisprodukte allein werden angefordert, sondern alles von der Datenerfassung über die Prozessierung und Analyse bis hin zur fertigen Präsentation der Ergebnisse aus einer Hand.

Alle diese Veränderungen und neuen Anforderungen an die Luftbildvermessung sind nur realisierbar,

wenn alle Komponenten der Prozesskette optimal aufeinander abgestimmt sind und reibungslos ineinandergreifen. Effiziente Sensoren, die auf den jeweiligen Anwendungsfall optimiert sind in Verbindung mit einem hohen Grad an Automatisierung sind die Garanten für qualitativ hochwertige Daten und daraus abgeleitete Produkte.



Abbildung 1: Trends in der luftgestützten Vermessung.

#### 4 Sensoren

Moderne Luftbildsensoren zeichnen sich durch einen sehr hohen Grad an Spezialisierung aus. Es gibt drei Hauptklassen an Luftbildsensoren für die folgenden Einsatzgebiete:

1. Erfassung von Städten mit dem Ziel 3D Stadtmodelle zu erstellen
2. Klassische Luftbildphotogrammetrie für die Erfassung von Orthophotos, DGM und DOM sowie die 3D Stereoauswertung
3. Erfassung sehr großer Gebiete für die Orthophotoproduktion

Jedes dieser Einsatzgebiete erfordert eine andere Art an Sensor. Für 1. Wird eine Kombination aus schräg und nadir blickenden Kameras benötigt. Die Größe des Footprints der Nadir Kamera ist weniger wichtig, dafür ist ein engerer Öffnungswinkel (FoV) vorteilhaft. Für 2. Wird ein Sensor benötigt, der in Flugrichtung einen möglichst großen Bereich abdeckt, um ein gutes Basis/Höhenverhältnis für die Stereoauswertung und die DOM Generierung zu erhalten. Für eine wirtschaftliche Erfassung ist zusätzlich ein Sensor mit genügend Bildelementen quer zu Flugrichtung notwendig, ohne durch einen zu großen Öffnungswinkel zu starke Verkippen an den Bildrändern zu verursachen. Für das 3. Einsatzgebiet werden Sensoren mit möglichst vielen Bildelementen quer zur Flugrichtung bevorzugt, das Basis/Höhenverhältnis ist weniger relevant, wie auch die Verkippenproblematik an den Bildrändern. Details zu den Sensorgrößen und Öffnungswinkeln sind in Tabelle 1 zu finden. Für die meisten der Sensoren gibt es jeweils Modelle mit

unterschiedlichen Brennweiten, um vergleichbare Ergebnisse aus unterschiedlichen Flughöhen erreichen zu können.

Tabelle 1: Luftbildkameras für unterschiedliche Einsatzzwecke.

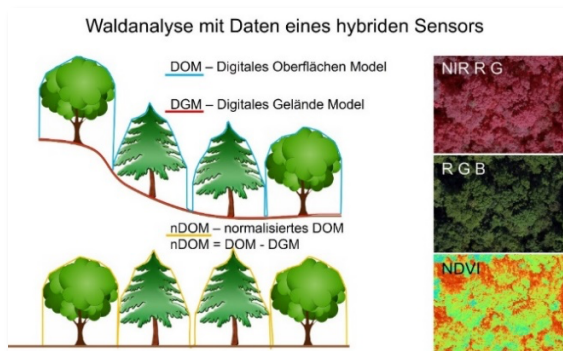
Einsatzgebiet	Anzahl der Kameras (Blickrichtungen)	Sensorgroße quer zu Flugrichtung	Sensorgroße in Flugrichtung	FoV [deg]	Beispiele
Erfassung von Städten	5	14.000 bis 25.000	10.000 bis 15.000	20 bis 40	Leica CityMapper, Vexcel Osprey, PhaseOne Pas880, IGI UrbanMapper
Klassische Luftbildphotogrammetrie	1	~30.000	Min 14.000	35 bis 50	Leica DMC-4, Vexcel Eagle
Erfassung großer Gebiete	1	45.000 bis 50.000	~14.000	50 bis 60	Leica ContentMapper, Vexcel Condor

Neben den bildgebenden Sensoren haben die Flugzeuggestützten Laserscanner immer mehr an Bedeutung gewonnen. Anders als die bildgebenden Sensoren sind Laserscanner aktive Systeme, bei denen mit Hilfe eines Laserimpulses die Landschaft abgetastet wird. Als aktives System benötigt ein Laserscanner kein Sonnenlicht und kann einen 3D Punkt durch eine einzelne Messung erzeugen. Somit kann mit Laserscannern in der Nacht oder bei schwierigen Lichtverhältnissen eine Datenerfassung erfolgen. Zusätzlich ist ein Laserscanner in der Lage kleinste Zwischenräume zwischen Blättern und Ästen zu nutzen, um Vegetation sozusagen zu durchdringen und die gesamte 3D Struktur von Wäldern zu erfassen, inklusive des Bodens für die Erstellung hochgenauer digitaler Geländemodelle (DGM). Hiermit sind die Laserscanner eine zur bildbasierten Datenerfassung komplementäre Technologie, die sich hervorragend ergänzen.

Modernste Flugzeug getragene Sensorsysteme nutzen die Kombination von bildgebenden Sensoren zusammen mit Laserscannern zu hybriden Sensoren aus, um das Beste aus beiden Welten miteinander zu kombinieren (Bacher, 2022). Beispiele für moderne hybride Sensoren sind von Leica Geosystems der CityMapper-2 und der CountryMapper oder von Vexcel die UltraCam Dragon 4.1. Der CityMapper und die Dragon sind hierbei Kombinationen aus senkrecht und schräg blickenden Kameras zusammen mit einem Laserscanner, mit der urbanen Kartierung als Haupteinsatzzweck, der CountryMapper dagegen ist konzipiert für die kombinierte Erfassung großer Landschaften mit Bild (großformatig) und Laserscanner. Mit Hilfe der simultan erfassten Bild und Laserscannerdaten können die Schwächen des jeweils anderen Teilsystems ausgeglichen werden.

So kann mit dem Laserscanner die 3D Struktur von Wäldern erfasst werden und zusätzlich kann die

Bildinformation Aufschlüsse über die Art des Waldes und den Zustand liefern (Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Waldanalyse aus hybriden Sensordaten.

Bei der Kartierung von Innenstädten liefert jedes der drei Teilsystem einen Beitrag bei der Erzeugung eines 3D Stadtmodells. Zusätzlich wird die sehr hohe horizontale Genauigkeit der bildbasierten Daten durch die Laserdaten mit sehr hoher Höhengenaugkeit zu einem ausgeglichenen 3D Datensatz kombiniert. Details zu den aktuellen Sensorsystemen der wichtigsten Hersteller sind unter Leica Geosystems, 2024; Vexcel, 2024; PhaseOne, 2024 und IGI Intergrated Systems, 2024 zu finden

## 5 Workflow

Die Trends in der modernen Luftbild-photogrammetrie machen deutlich, dass die hohen Erwartungen an die Technologie nur dann erfüllt werden können, wenn alle Komponenten und Teilprozesse optimal zusammenarbeiten. Die Projekte werden größer, die Auflösungen kleiner und die Zeit von der Erfassung bis zur Lieferung soll kürzer werden. Dieser offensichtliche Widerspruch lässt sich nur durch eine hohe Automatisierung in den Prozessen auflösen.

Betrachtet man hierbei den gesamten Projektverlauf von der Flugplanung bis hin zur Lieferung der fertigen Produkte ergeben sich einige Bereiche mit nicht unerheblichem Potential für die Optimierung. Der Bereich Datenerfassung wurde bereits bei der Beschreibung der Sensorentwicklung betrachtet und zeigt hier, wie durch effizientere Sensoren die Zeiten für die Befliegung reduziert werden können.

Der Bereich, in dem sich aktuell die größten Veränderungen zeigen ist die Prozessierung der Daten, von den Rohdaten bis hin zu den fertigen Produkten. Nur wenige Teilschritte, wie zum Beispiel die Messung von Passpunkten, benötigen manuelle Unterstützung, die meisten Prozesse sind hochautomatisiert. Hier zeigt sich ein Trend hin zur

(teilweisen) Verlagerung der Prozessierung hin zur Nutzung Cloud basierter Infrastruktur. Hiermit lassen sich rechenintensive Prozesse gut skalieren und die Zeiten von der Befliegung bis zur Lieferung der Resultate auf ein Minimum verkürzen. Diese Verlagerung in die Cloud setzt sich besonders bei den Arbeitsschritten immer mehr als Option durch, die Hardware (Sensor) unabhängig sind, wie zum Beispiel die Erstellung von True Orthophotos oder 3D Stadtmodellen. Bei sensornahen Prozessen, wie dem Ingest, der Rohdaten in die eigentlichen Bild- oder Lidardaten umwandelt, wird in der Regel noch verstärkt auf lokale Rechenleistung gesetzt. Für die Erstellung von Folgeprodukte werden mehr und mehr vorbereitete Cloud Lösungen bereitgestellt.

## 6 Daten und Produkte

Die moderne Luftbildphotogrammetrie dient heute mehr denn je als Lieferant für die räumlichen Grundlagendaten. Neben den klassischen Produkten wie Orthophotos (DOP), Stereomodellen und digitalen Geländemodellen (DGM) sind eine ganze Reihe neuer Produkte dazu gekommen.

Als neue Datenprodukte etablieren sich photogrammetrisch erzeugte Punktwolken (pDOM), hierbei werden mit Hilfe von „Dense Image Matching“ auf Basis von Semi Global Matching 3D Punktwolken erzeugt, bei denen für jedes Bildelement eine 3D Koordinate generiert wird. Die Punktwolke wird typischerweise mit den Farbwerten der korrespondierenden Pixel eingefärbt. Die so erzeugte Punktwolke entspricht in weiten Teilen einem digitalen Oberflächenmodell, mit der Ausnahme, dass je nach verwendeten Bilddaten auch vertikale Strukturen, wie Fassaden, rekonstruiert werden können. Aus dem pDOM werden zusätzlich regelmäßig gerasterte digitale Oberflächenmodelle (DOM) abgeleitet. Durch die große Detailierung und damit verbundenen Kantenschärfe können die pDOMs hervorragend für die Erzeugung von TrueOrthophotos (TDOP) genutzt werden. TDOPs wurden zunächst vor allem im Bereich der urbanen Kartierung als Alternative zu klassischen Orthophotos genutzt, werden aber inzwischen mehr und mehr auch in der Fläche angeboten. Der Vorteil der TDOPs gegenüber den klassischen DOPs liegt in der korrekten Geometrie aller im Bild sichtbaren Objekte und damit der vollständigen Eliminierung von Verkippungseffekten sowie damit verbundenen sichttoten Bereichen. Wichtig zu erwähnen ist jedoch, dass der Befliegungsaufwand für TDOPs

größer ist (Minimum 50 % Querüberlappung) als für klassische DOPs (klassisch 30% Querüberlappung).

Für die beste Nutzung der hochwertigen 3D Daten hat sich, zunächst für Stadtmodelle später aber auch für die Fläche, das 3D Mesh als Datenprodukt etabliert. Der Vorteil eines 3D Mesh gegenüber eines Orthophotos oder einer Punktwolke ist die detaillierte dreidimensionalität in Verbindung mit der visuellen Qualität eines Bildproduktes. Teilweise wird bei einem 3D Mesh deshalb auch von einem 3D Ortho gesprochen.

Künstliche Intelligenz hat auch in der Luftbildphotogrammetrie Einzug gehalten und erlaubt die Ableitung und Analyse immer neuer Produkte und Informationen. Ein Beispiel hierfür ist die operationelle Erzeugung von Landbedeckungsklassifikationen. Das ist im Grunde zwar nicht neu, jedoch sind die entsprechenden neuronalen Netze in einer Art und Weise trainiert, dass sehr unterschiedliche Landschaftstypen und Eingangsdaten analysiert werden können, ohne jeweils neue Modelle trainieren zu müssen. In Verbindung mit hybriden Datensätzen sind sogar 3D Klassifizierungen möglich, bei denen die Oberfläche einer anderen Klasse zugeordnet werden kann als der Boden. Ein Beispiel hierfür wäre eine Straße die teilweise von Bäumen abgeschattet ist, hier wird das DOM der Klasse Baum und der Boden der Klasse Straße (oder versiegelte Fläche) zugeordnet.

## 7 Vom Sensor zur Lösung

Für viele Nutzer von Geodaten sind die oben beschriebenen Grundlagendaten nicht genug, bzw. sie bevorzugen die direkte Integration bzw. Interaktion der Grundlagendaten mit anderen Daten und entsprechenden Analysen in dedizierte Lösungen. Allgemein gesprochen bilden die Resultate der Luftbildphotogrammetrie die Grundlage für räumliche digitale Zwillinge (Abbildung 3). Sie geben hiermit den Rahmen vor in dem alle anderen Informationen vorgehalten werden. Zusätzlich zum räumlichen Rahmen der vielfach der Orientierung dient sind die photogrammetrischen Daten ein wichtiger Bestandteil des digitalen Zwillinges selbst. So lassen sich aus den Daten Versiegelungskarten erstellen, die in Verbindung mit Geländemodellen, Wetterdaten und Abflussmodellen Starkregenereignisse detailliert auf lokaler Ebene simulieren können.

Ein weiteres Beispiel wie die Daten der Luftbildphotogrammetrie dazu beitragen können Städte

angesichts des Klimawandels zukunftssicher zu machen ist die Erstellung eines Baumkatasters und einer daraus abgeleiteten Modellierung von Beschattungen. Oder wenn man es von der anderen Seite aus betrachtet einer Simulation von potenziellen Gebieten, die bei starker Sonneneinstrahlung zu Hitzeinseln werden können. Die Daten hierfür stammen von Luftbildsensoren und werden hochautomatisiert verarbeitet und den potenziellen Nutzern als Dashboards zur Verfügung gestellt. Die Nutzer können sich so auf Ihre speziellen Aufgaben konzentrieren und benötigen keine speziellen photogrammetrischen oder GIS-Kenntnisse.

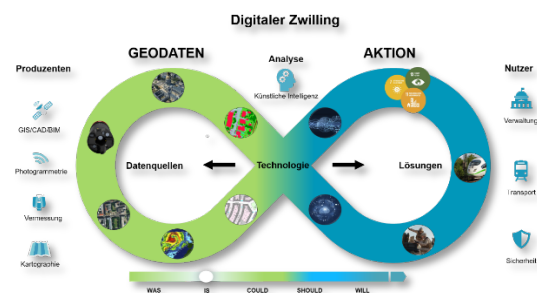


Abbildung 3: Prinzip des digitalen Zwillinges für Städte oder größere räumliche Gebiete.

## 8 Ausblick

Betrachtet man die rasanten Entwicklungen der Technologie in der Luftbildphotogrammetrie stellt sich die Frage wie wird sich die Technologie weiterentwickeln. Es zeichnet sich ab, dass die Sensortechnik sich weiter verbessern wird. Damit wird man in der Lage sein, Kameras mit immer mehr Bildelementen zu bauen. So lassen sich dann bei vergleichbarem Erfassungsaufwand immer bessere Auflösungen erreichen. Das bedeutet jedoch auch, dass immer mehr Daten anfallen die prozessiert gespeichert und übertragen werden müssen. Immer höhere Auflösungen sind nicht immer sinnvoll und bringen neue Probleme mit sich. In Städten zum Beispiel werden Bilddaten häufig schon mit Auflösungen besser als 5 cm erfasst. In diesem Auflösungsbereich muss man sich immer auch Gedanken zur Wahrung der Persönlichkeitsrechte und des Datenschutzes machen. Nicht immer ist alles, was technisch möglich ist auch immer sinnvoll bzw. rechtskonform.

Der Trend zu Multisensorik in einem Sensor ist schon in vollem Gange, es werden Kamerasysteme mit Lidar kombiniert (Leica CityMapper/CountryMapper) oder optische Systeme mit Thermalsensoren kombiniert (IGI EcoMapper).

Sicherlich wird man hier zukünftig noch weitere interessante Kombinationen sehen.

Ein weiterer Punkt ist die Nutzung der künstlichen Intelligenz in der Luftbildphotogrammetrie. Deren Einsatz wird sich in allen Bereichen der Prozesskette intensivieren und damit wertvolle Hilfe bei Flugplanung, Qualitätssicherung und Informationsextraktion leisten. Diese Möglichkeiten werden zukünftig sicher immer stärker in die Sensorik selbst integriert werden. Die Qualität wird sich damit erhöhen können und die Zeiten von der Planung bis zur Lieferung werden sich nochmals deutlich verkürzen.

*solutions/aircraft-systems/, (zuletzt aufgerufen September 2024)*

*IGI Integrated Systems [2024]: IGI Produktübersicht, <https://www.igi-systems.com>, (zuletzt aufgerufen September 2024)*

**Anschrift des Verfassers:**

Dr. Uwe Bacher  
Technischer Direktor  
Hexagon Innovation Hub  
Eichenstrasse 5  
82064 Strasslach-Dingharting  
[uwe.bacher@hexagon.com](mailto:uwe.bacher@hexagon.com)

## Literatur/Quellen

*Bacher, U. [2022]: HYBRID AERIAL SENSOR DATA AS BASIS FOR A GEOSPATIAL DIGITAL TWIN, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., Vol. XLIII-B4-2022*

*Cramer, M [2006]: DIGITAL AIRBORNE CAMERAS – STATUS AND FUTURE, in Proceedings ISPRS workshop "High resolution earth imaging for geospatial information", University of Hannover, Hannover/Germany, May 17-20, 2005*

*Hirschmüller, H. [2005]: ACCURATE AND EFFICIENT STEREO PROCESSING BY SEMI-GLOBAL MATCHING AND MUTUAL INFORMATION. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 807- 814*

*Leberl, F. [2012]: THE ULTRACAM STORY, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012*

*Lowe, D. G. [2004]: DISTINCTIVE IMAGE FEATURES FROM SCALE-INVARIANT KEYPOINTS, International Journal of Computer Vision, 60(2), 91-110*

*Tempelmann, U et al [2000]: PHOTOGAMMETRIC SOFTWARE FOR THE LH SYSTEMS ADS40 AIRBORNE DIGITAL SENSOR, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B2. Amsterdam 2000*

*Vexcel [2024]: Vexcel Imaging Produktübersicht, <https://www.vexcel-imaging.com/products/> (zuletzt aufgerufen September 2024)*

*Leica Geosystems [2024]: Leica Geosystems Produktübersicht, <https://leica-geosystems.com/de-de/products/airborne-systems> (zuletzt aufgerufen September 2024)*

*PhaseOne [2024]: PhaseOne Produktübersicht, <https://www.phaseone.com/solutions/geospatial->*



Martin Drauschke

## Erinnerungen an meine Zusammenarbeit mit Helmut Mayer und das Projekt „3D-Modelle für Urbane Operationen“

### Zusammenfassung

Helmut Mayer und Martin Drauschke kennen sich seit 2006 und haben von 2009 bis 2018 eng zusammengearbeitet, u. a. im Projekt „3D-Modelle für Urbane Operationen“. Martin Drauschke umreißt wichtige Publikationen des Lehrstuhls aus dieser Zeit, benennt die anderen Kollegen und berichtet von den Aufnahmekampagnen dieses Projekts. Vor allem ist dieser Beitrag eine Würdigung von Helmut Mayer als Lehrstuhlinhaber, und Martin Drauschke berichtet, was er als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Helmut Mayer gelernt hat.

### 1 Einleitung

Von Oktober 2009 bis Juni 2014 war ich wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl von Helmut Mayer an der Universität der Bundeswehr (UniBw) in Neubiberg. Zehn Jahre später hat Wolfgang Reinhardt mich angeschrieben, ob ich mich an der Festschrift anlässlich des 60. Geburtstags von Helmut Mayer mit einem Beitrag beteiligen kann und möchte. Ich musste nicht lange darüber nachdenken, habe ich doch die Zusammenarbeit mit Helmut Mayer noch in guter Erinnerung. Zudem bin ich Helmut Mayer auch freundschaftlich verbunden.

Es war ein guter Anlass, in alten Dokumenten wie Publikationen, Vorträgen und Fotos zu stöbern. Die stärkste Zusammenarbeit mit Helmut Mayer betrifft dabei das Projekt „3D-Modelle für Urbane Operationen“, dessen drei Phasen ich begleiten und mitgestalten konnte (Abbildung 1). Zuletzt nahm ich dabei die Rolle des Projektleiters ein. Diese Tätigkeit übe ich heute noch aus, wenn auch beim Bundesamt für Justiz in einem völlig anderen Bereich.

Ich gliedere meine Erinnerungen in die drei Phasen der Zusammenarbeit mit Helmut Mayer und schließe dann mit einem kleinen Fazit ab, inwiefern ich noch heute von dieser Zusammenarbeit profitiere.

### 2 Phase I: 2006 – 2009

Helmut Mayer und ich haben uns 2006 kennengelernt. Ich war damals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl von Wolfgang Förstner an der Universität Bonn. Dort beschäftigte ich mich mit

der Erkennung von Gebäuden und deren Teilen wie Dächern, Fenstern und Türen in Luft- und Fassadenbildern.



**Abbildung 1:** Aufnahmekampagne 2014 auf dem TrÜbPl Altmark. Das Foto zeigt (v.l.n.r.) Martin Drauschke (DLR), Matthias Schmitz, Lukas Roth (beide UniBw) und Hannah Kaufmann (DLR). Im Hintergrund ist eins der Forsthäuser des Truppenübungsplatzes zu sehen.

Ich kam 2006 mit Helmut Mayer gleich auf zwei Weisen in Berührung: Ich traf ihn bei Besprechungen des DFG-Bündelprojekts „Abstraktion von Geoinformation bei der multiskaligen Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung“, und dann traf ich ihn auch noch im Rahmen der Vorbereitung bzw. Durchführung der Konferenz der ISPRS-Kommission III (Photogrammetric Computer Vision PCV'06). Die Leitung dieser Kommission hatten Wolfgang Förstner und Helmut Mayer für die vier Jahre 2004 bis 2008 übernommen.

Die PCV'06 war meine erste wissenschaftliche Konferenz, bei der ich auch gleich meinen ersten wissenschaftlichen Vortrag halten durfte (Drauschke

et al., 2006). Helmut Mayer hielt ebenfalls einen Vortrag (Mayer und Reznik, 2006). Auch in den Folgejahren begegneten wir uns immer wieder bei Besprechungen des Bündelprojekts oder auf Konferenzen. Die Erkennung von Gebäudestrukturen in Bildern oder Bildsequenzen hat uns dabei bereits verbunden. Bildsegmentierung und Objekterkennung in Bildern, Markov Chain Monte Carlo Ansätze, wiederholte Strukturen und Grammatiken sind Themen die uns beide interessierten.

Eine meiner früheren Veröffentlichungen (Wenzel et al., 2007) hat Helmut Mayer in seinen Lehrveranstaltungen eingebaut, worüber ich mich später, als ich es erfuhr, sehr gefreut habe. Bei dieser Veröffentlichung lernte ich Helmut Mayer in einer weiteren Funktion kennen: Er war 2007 Hauptschriftleiter der Zeitschrift Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG) geworden.

### 3 Phase II: 2009 – 2014

Im Frühsommer 2009 erfuhr ich, dass Helmut Mayer einen wissenschaftlichen Mitarbeiter sucht, da der langjährige Mitarbeiter des Lehrstuhls, Jürgen Peipe, in den Ruhestand geht. Ich bewarb mich und bekam die gewünschte Stelle. Vielleicht hat bei meiner Bewerbung geholfen, dass Helmut Mayer im Jahr zuvor an das Institut für Informatik gewechselt ist, weil der Studiengang für Geodäsie an der Universität eingestellt wurde, und ich von der Ausbildung her auch ein Diplom-Informatiker bin.

Einer der Vorzüge der UniBw ist die sehr gute finanzielle Ausstattung der Lehrstühle. Ich kann mich erinnern, dass immer ausreichend Mittel da waren, wenn Computer oder andere Arbeitsgeräte benötigt wurden. Ich möchte an dieser Stelle nicht erörtern, woran das liegt: an den zur Verfügung stehenden Haushaltsmitteln oder an der erfolgreichen Akquise von Drittmitteln. Auch Helmut Mayers Vorgänger Egon Dorrer konnte seinen Lehrstuhl gut ausstatten.

Ich bekam das insofern als herausforderndes Erlebnis zu spüren, weil es eine meiner ersten Aufgaben war, den Umzug in neue Räume zu organisieren und das dabei nicht mehr benötigte Inventar zu entsorgen. Mein Eindruck war, dass die 30 Jahre zuvor kein einziger inventarisierter Gegenstand weggeworfen worden ist. In den großzügig bemessenen Laborräumen standen diverse photogrammetrische Großgeräte wie ein Entzerrungsgerät SEG 5 sowie Computer aus beinahe allen Jahren seit 1975 und in diversen Größen. Dazu gab es noch häufig fein

säuberlich abgeheftete Unterlagen und Ausdrücke von inzwischen bedeutungslos gewordenen Zahlen, die die Regale füllten. Helmut Mayer hat meinen Aufräumaktionismus tatkräftig unterstützt und mir bei den gemeinsamen Laborbegehungen die einzelnen Geräte erklärt. Rückblickend finde ich es schade, dass alle Geräte auf dem Schrottplatz (Abbildung 2) oder im Computermuseum der Universität gelandet sind, denn hier bekam ich einen guten Eindruck in den Digitalisierungsprozess der Photogrammetrie. Aber durch diesen Aufräumprozess konnten Helmut Mayer und seine Mitarbeiter sehr schöne, neue Räume in der unmittelbaren Nähe Wolfgang Reinhardts Lehrstuhl beziehen (Abbildung 3).



Abbildung 2: Nicht mehr benötigte photogrammetrische Großgeräte und Computer auf dem Weg zur Entsorgung.



Abbildung 3: Andreas Kuhn im neu eingerichteten Büro.



Das Auslaufen des geodätischen Studiengangs hatte auch die Auswirkung, dass Helmut Mayer seine Lehrangebote neu konzeptionieren musste. Ich bekam so die Gelegenheit, mir Übungen zu den neuen Lehrinhalten wie Optischer Fluss und Computer Graphik auszudenken. Hierbei wurde ich nicht nur von Helmut Mayer unterstützt, sondern auch durch die neu eingestellten Kollegen, die ihre Arbeit am Projekt „3D Modelle für Urbane Operationen (UrbOp)“, Phase II, 2011 begannen: Andreas Kuhn, Mario Michellini und William Nguatem.

Die erste Phase des Projekts hatte 2008 mit nur einem einzigen Projektmitarbeiter begonnen und war so erfolgreich gewesen, dass das Projekt vom Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) aufgestockt wurde. Nun umfasste das Projekt die Bestimmung der Orientierung aus Bildsequenzen und die Rekonstruktion dichter Punktwolken (Bartelsen et al., 2012) sowie die Erkennung und Modellierung von Gebäuden in diesen Punktwolken.

Die Betreuung von sechs Diplomarbeiten gleichzeitig gehörten zu unseren letzten Lehrangeboten für den geodätischen Studiengang. Das war für uns beide, Helmut Mayer und mich, viel Arbeit. Aber sie hat sich gelohnt: Die beste Arbeit führte zu einer Publikation, auf die ich heute noch gern zurückblicke (Brandenburger et al., 2013). Auch hat Wolfgang Brandenburger später den Weg an den Lehrstuhl von Helmut Mayer zurückgefunden und dort als wissenschaftlicher Mitarbeiter gewirkt.

Aber zurück zum Projekt UrbOp: Zu den schönsten Erinnerungen an das Projekt gehören die Aufnahmekampagnen, die wir in dieser Zeit immer auf dem TrÜbPl Hammelburg durchführten. An zwei oder drei Wochenenden im Jahr konnten wir in dem Übungsdorf Bonnland mit Fluggeräten und Kameras Gebäude fotografieren, die die Bundeswehr zum Trainieren des Häuserkampfes benutzt. Bonnland ist ein ehemaliges bewohntes Dorf mit einem kleinen Schloss oberhalb der Ortschaft, die um einzelne neuere Gebäude erweitert worden ist. Die Gebäude stehen teilweise frei, aber häufig sehr eng nebeneinander, bieten aber realistische Gebäudeteile wie Eingänge, Treppenaufgänge und Dachformen mit Gauben und anderen Öffnungen. Lediglich die Fenster waren ohne Fensterscheiben, um Verletzungen vorzubeugen, sodass sie nur mittels Fensterläden geschlossen werden konnten.

Bei diesen Aufnahmekampagnen konnte ich den Einsatz von ferngesteuerten Fluggeräten (unmanned aerial vehicle, UAV) miterleben. Flächenflieger mit

einfachen Kameras kamen zum Einsatz, aber auch Quadro- oder Oktokopter mit deutlich besseren Kameras (Abbildung 4). Viele Bildsequenzen wurden manuell mit einer normalen Kamera aufgenommen, teilweise unter gleichzeitiger Erfassung der GPS-Position (Abbildung 5). Da die Aufnahmekampagnen teilweise mehrere Monate im Voraus geplant wurden, waren unsere erhobenen Daten stark vom Wetter abhängig. Ich kann mich noch an eine Fahrt im frühen April erinnern, bei der es so kalt war, dass die Oktokopter kaum bis zur Traufandhöhe des Gebäudes kamen, weil die Akkuleistung schlagartig sank.



**Abbildung 4:** Aufnahmekampagne 2012 auf dem TrÜbPl Hammelburg. Das obere Foto zeigt links das Falcon-UAV und (v.l.n.r.) Martin Drauschke, Florian Seibel (Pilot) und Patrick Reidelstürz (alle UniBw). Das untere Foto zeigt Patrick Reidelstürz (UniBw) beim Zusammenbau seines Flächenfliegers.



**Abbildung 5:** Aufnahmekampagne 2012 auf dem TrÜbPl Hammelburg. Das Foto zeigt William Nguatem (UniBw) bei der Bildaufnahme mit Unterstützung eines Satellitenpositionierungsdienstes.

Wir konnten den Truppenübungsplatz nur betreten, wenn dort keine Übungen der Bundeswehr stattfanden, das heißt also an Wochenenden. Wir hatten dann Bonnland meistens für uns allein. Durch

die Abgeschlossenheit des Dorfes konnten wir uns einerseits gut auf die Arbeit konzentrieren, andererseits hatten diese Ausflüge den Charakter von Klassenfahrten, bei denen wir uns nach getaner Arbeit gut amüsierten. Für die Teambildung unter den Mitarbeitern war das bedeutsam.

Das UrbOp-Projekt füllte auch die Reisekasse des Lehrstuhls. Dadurch konnten Helmut Mayer, die Mitarbeiter des Projekts und ich zu vielen Konferenzen fahren oder auch zu Projektbesprechungen in Liegenschaften der Bundeswehr wie das ZGeoBw in Euskirchen oder zu einem Symposium auf dem Truppenübungsplatz in Wildflecken.

In meinen Konferenzbeiträgen habe ich in der damaligen Zeit oft versucht, die wissenschaftlichen Arbeiten aus meiner Bonner Zeit am Lehrstuhl von Wolfgang Förstner fortzusetzen und um die Erkenntnisse aus der Zusammenarbeit mit Helmut Mayer in neue Bahnen zu lenken (Drauschke und Mayer, 2010). An dieser Stelle passt es gut, mich bei Helmut Mayer dafür zu bedanken, dass er mir diese Möglichkeiten gegeben hat. Das ist auch eine gute Textstelle, um kurz auf Helmut Mayers Arbeitsweise an Publikationen einzugehen. Er ist ein schneller Denker und lernte einst mit 10-Finger-System auf der Tastatur zu schreiben, um seine Gedanken so schnell aufschreiben zu können, wie sie ihm kommen. Zu der Schnelligkeit kommt eine hohe Selbstorganisation, sodass er stets seine Manuskripte drei Wochen vor der Abgabe fertigstellen kann. Das gibt ihm die Zeit, die Texte immer wieder zu redigieren, sodass ein hohes Maß an Perfektion erreicht wird. Ich bin davon heute noch beeindruckt.

In der Phase II des Projekts UrbOp fand bereits eine Zusammenarbeit mit Heiko Hirschmüller vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) statt. Andreas Kuhn hat dort an zwei Tagen pro Woche als externer Mitarbeiter wirken können; Helmut Mayer und ich führen alle paar Wochen zu Besprechungen nach Oberpfaffenhofen. So lernte ich den Projektpartner kennen, der in der dritten Projektphase mit fünf weiteren Stellen stärker involviert sein wird. Das DLR sollte meine nächste Arbeitsstation werden, wobei ich den Lehrstuhl von Helmut Mayer nur bzgl. des Angestelltenverhältnis verließ. Dem Lehrstuhl blieb ich noch einige Jahre eng verbunden. Bevor ich zum DLR wechselte, begann die dritte Phase des Projekts schon an der Universität der Bundeswehr, und neue Kollegen, Hai Huang, Lukas Roth und Matthias Schmitz, nahmen dort ihre Arbeit auf (Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Aufnahmekampagne 2014 auf dem TrÜbPl Hammelburg. Auf dem Foto sind v.l.n.r. Wolfgang Brandenburger, Lukas Roth, Matthias Schmitz, Martin Drauschke, Lukas Müller und Andreas Kuhn (alle UniBw) zu sehen.

#### 4 Phase III: 2014 – 2018

Wenn ich mich an meine Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim DLR erinnere, dann fällt mir mit als erstes ein, wie gerne ich zu jeder möglichen Besprechung zurück an die Universität der Bundeswehr kehrte. Ich habe mich immer wieder darüber gefreut, Helmut Mayer und die ehemaligen Kollegen wiederzusehen und mich mit ihnen auszutauschen. Dieser Austausch war auch aus Projektsicht notwendig, um die Arbeiten der vielen Kolleginnen und Kollegen zu koordinieren, denn das Team ist für die dritte Projektphase ordentlich angewachsen (Abbildung 7). Nicht nur an der UniBw arbeiteten nun viele Mitarbeiter an dem Projekt, auch das DLR verteilte seinen Arbeitsanteil auf diverse Kolleginnen und Kollegen. Mein Kollege Stefan Kühne und ich waren dabei die einzigen beiden, die beim DLR in Vollzeit an dem Projekt mitwirkten. Der Abgang meines Abteilungsleiters Michael Suppa sowie des Mitarbeiters Heiko Hirschmüller nach weniger als einem Jahr nach Projektbeginn waren für mich eine herbe Enttäuschung und für das Projekt eine besondere Herausforderung.



**Abbildung 7:** Gruppenfoto zu Beginn des Projekts UrbOp3 mit Kolleginnen und Kollegen der UniBw, des DLR und des ZGeoBw.

Inhaltlich ist das Projekt auch weiter aufgestellt worden. Das DLR brachte seine Expertise beim Semiglobal Matching (Hirschmüller, 2005) ein, das als FPGA-Implementierung auf den Demonstrator-Rechnern installiert werden sollte. Dazu kamen Arbeiten zur Anpassung der Farbgebung und Texturen bei der Visualisierung der rekonstruierten 3D-Modelle sowie zur Fusion der Modelle (Bracci et al., 2018). Eine wichtige Aufgabe des DLRs war es auch, eine Benutzeroberfläche zu entwickeln, damit die Kolleginnen und Kollegen des ZGeoBw den Umgang mit der Software erlernen konnten, ohne das Spezialwissen der Forschenden vorauszusetzen. Die Ziele des Projekts UrbOp3 habe ich damals in einer Bildmontage zusammengestellt (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Projektziele von UrbOp3. Die Bundeswehr möchte Gelände und 3D-Modelle aus Bildern unterschiedlichster Kameras und Trägersysteme ableiten und gemeinsam visualisieren. Geländemodelle werden dabei aus Aufnahmen von Satelliten, von Flugzeugen oder Flächenfliegern abgeleitet; 3D-Modelle aus Aufnahmen von UAV und anderen auf dem Boden bleibenden Erfassungssystemen oder Einzelbildern abgeleitet. Um die Kollegen des DLR zu motivieren, wurde deshalb auch ein robotisches System eingebaut, auch wenn dies in der Projektarbeit nicht aufgegriffen wurde. Als Personen sind abgebildet (v.l.n.r.) Martin Drauschke (DLR), Mario Micheleni, William Nguatem, Andreas Kuhn (UniBw) und Patrick Reidelstürz (inzwischen FH Deggendorf).

Ich begleitete weiterhin meine alten Kollegen zu weiteren Aufnahmekampagnen, die sich nun nicht nur zum TrÜbPl Hammelburg führten, sondern auch auf den TrÜbPl Altmark (Abbildung 9) und zu anderen Standorten der Bundeswehr wie Calw (Kommando Spezialkräfte, KSK) oder Euskirchen (ZGeoBw), aber auch nach Oostdorp in den Niederlanden.



**Abbildung 9:** Aufnahmekampagne 2014 auf dem TrÜbPl Altmark. Auf dem oberen Foto sind Matthias Schmitz (UniBw, links) und Hannah Kaufmann (DLR, rechts) sowie das zum Einsatz gekommene Falcon-UAV (mittig) zu sehen. Auf dem unteren Foto sind v.l.n.r. Martin Drauschke (DLR), Matthias Schmitz, Lukas Roth (beide UniBw) und Hannah Kaufmann (DLR) und im Hintergrund Gebäude des Bereichs Schnöggersburg zu sehen.

Für Helmut Mayers Lehrstuhl war diese dritte Projektphase sehr erfolgreich, wie verschiedene hochrangige Publikationen belegen (Kuhn et al., 2016; Kuhn et. al., 2017; Mayer et al. 2017; Nguatem und Mayer, 2017). Mir bleibt diese Zeit vor allem durch unseren Aufsatz (Nguatem et al., 2016) in Erinnerung, für den wir einen der Best Poster Paper Awards erhielten. William Nguatem war als Erstautor nicht zum ISPRS Congress nach Prag gefahren, weil er seine Forschung nicht unterbrechen und konzentriert an der nächsten Veröffentlichung arbeiten wollte. Ich habe als Zweitautor das Poster auf dem ISPRS Congress präsentiert, war aber zur Award-Vergabe bereits aus familiären Gründen abgereist. So hat dann Helmut Mayer als dritter Autor den Award entgegengenommen.

Der ISRS Congress 2016 in Prag blieb mir auch aus einem anderen Grund in guter Erinnerung. Es gab einen Zeitraum von vielleicht zwei Stunden, in denen wir, Helmut Mayer und ich, uns vom Konferenzgebäude entfernten, um das Technische Nationalmuseum zu besichtigen. Helmut Mayer führte mich durch die Bergbau-Abteilung und erklärte mir diverse Exponate aus dem Bergbau, als wäre er ein Kind des Ruhrgebiets, sowie natürlich

den übersichtlichen Bereich zur Vermessung und Photogrammetrie.

Das ZGeoBw als Auftraggeber des Projekts UrbOp begann in der dritten Phase mit einer verstärkten Vermarktung der Projektinhalte innerhalb der Bundeswehr. So wurde das Projekt auch beim KSK vorgestellt. Zudem nutzten wir den Tag der Offenen Tür der Mercator-Kaserne in Euskirchen, um das Projekt dort vorzustellen. Diese „Vorstellung“ geschah zweiteilig: Im Vortragsraum präsentierte ich die Ergebnisse des Projekts, vor dem Gebäude erklärten meine Kollegen Lukas Roth und Matthias Schmitz die Funktionsweise des mitgebrachten UAV (Abbildung 10). Beim Tag der offenen Tür konnten wir aus Sicherheitsgründen den Oktokopter nicht fliegen lassen, dafür haben wir das Kasernenareal am Vortag überflogen. Das Gebäude mit seiner weißen Außenfassade und den vielen Spiegelungen in den Fenstern war ein besonders schwieriger, aber eben auch interessanter Datensatz bei späteren Testläufen der im Projekt zu erstellenden Software. Zudem freute sich das ZGeoBw über ein Schrägbild des gesamten Kasernenareals, das man für die weitere Öffentlichkeitsarbeit des ZGeoBw verwenden wollte.



**Abbildung 10:** Lukas Roth und Matthias Schmitz (beide UniBw) präsentieren das UAV mit Oberstleutnant Stefanie Reichelt (ZGeoBw) beim Tag der offenen Tür des ZGeoBw 2015 in der Mercator-Kaserne in Euskirchen.

Dann habe ich noch ein Foto gefunden, das ich bei einer Aufnahmekampagne aufgenommen habe, bei der die Firma GerMAP aus Welzheim Bildsequenzen vom TrÜbPl Altmark mit einem Flächenflieger aufnahm (Abbildung 11). Hier fand eine klassische photogrammetrische Flugplanung statt. Zum ersten Mal erlebte ich etwas in der Praxis, was ich davor nur aus den Vorlesungen von Wolfgang Förstner und Helmut Mayer kannte.

Wenn ich mich so an diese vielen Aufnahmekampagnen erinnere, dann stelle ich fest, was für ein großes Datenarchiv von zwei Truppenübungsplätzen

am Lehrstuhl von Helmut Mayer vorhanden ist. Es wäre eine gute Grundlage für neue Arbeiten im Bereich Change Detection. Aber so viel ich heute noch mitbekomme, hat sich Helmut Mayer mit seinem Lehrstuhl anderen Themen zugewandt. Es gab noch eine letzte Projektphase ohne Mitarbeit des DLRs, die auch nicht mehr unter dem Namen UrbOp lief. Meine ehemaligen Kollegen konnten in dieser Zeit ihre Forschungen noch abschließen. Inwiefern die Bundeswehr die Projektergebnisse weiterverwendet, entzieht sich leider meiner Kenntnis. 2018 habe ich das DLR verlassen und dabei auch das wissenschaftliche Arbeitsumfeld.



**Abbildung 11:** Aufnahmekampagne 2017 auf dem TrÜbPl Altmark mit der Firma GerMAP. Aufgrund der Größe des Areals von Schnöggersburg kam ein Flächenflieger zum Einsatz.

## 5 Fazit der Zusammenarbeit

Was habe ich bei meiner Arbeit mit Helmut Mayer gelernt? Was kann ich heute noch davon anwenden? Ich arbeite nun seit fast sechs Jahren als IT-Projektleiter im Bundesamt für Justiz. Mein Wissen über Photogrammetrie kann ich dabei nicht einsetzen. 3D-Koordinaten, relative Orientierung, Fundamentalmatrix, Fluchtpunkt, Plane Sweeping, Vektormodell, RANSAC oder CAD – das sind für mich alles Begriffe aus einem früheren Lebensabschnitt.

Aber von mir wird heute wie auch damals erwartet, dass ich vorne stehe. Und das Projektteam schaut mich dann mit erwartungsvollen Augen an: Ich muss große, unlösbar scheinende Probleme in mehrere kleinere, lösbare Teile zerlegen und in eine zeitliche Reihenfolge bringen. Ich muss die Aufgaben priorisieren und mit Menschen über diese Probleme diskutieren, die eine andere Ausbildung haben und scheinbar eine andere Sprache sprechen, obwohl deutsch ihre Muttersprache ist. Sie denken anders als ich oder die technisch ausgebildeten Kolleginnen und Kollegen.

Ich habe bei Helmut Mayer erstmals die Verwaltung öffentlicher Gelder übernommen. Die Budgetverwaltung gehört auch heute wieder oder immer noch zu meinen Aufgaben. Ich habe bei Helmut Mayer erstmals Beschaffungen organisiert und dabei begründen müssen. Dafür bin ich heute auch zuständig. Ich habe von Helmut Mayer gelernt, wie man Anträge schreibt. Auch das muss ich hin und wieder in meinem neuen Arbeitsumfeld tun. Und ich bin dabei erfolgreich genug, dass mich die Kolleginnen und Kollegen aus anderen Projekten immer wieder um Rat bitten. So muss ich auch immer wieder etwas erklären. Wenn neue Softwaresysteme in Betrieb gehen, muss das Personal geschult werden. Insofern greife ich auch immer wieder auf Erfahrungen aus der Lehre, die ich bei Wolfgang Förstner und Helmut Mayer gesammelt habe, zurück.

Ich bin bislang immer nur auf die Arbeitsebene eingegangen, weil das für die Festschrift der passende Inhalt ist. Aber Helmut Mayer und ich pflegen auch einen privaten Kontakt, seitdem ich sein wissenschaftlicher Mitarbeiter geworden bin. Ich war bei seiner Hochzeitsfeier im Oktober 2009 dabei, kenne seine Frau Beatrice und seinen Sohn Jakob. Wir waren zusammen bei Konzerten in Neumarkt i. d. Oberpfalz, die seine Frau Beatrice Höhn gestaltete. Ich habe damals ebenfalls im Ballungsraum Nürnberg gewohnt. 2018 besuchte ich Helmut Mayer und wir wanderten gemeinsam mit seinem Sohn zur Burgruine Wolfstein.

Nun freue ich mich, Helmut Mayer bei der Feier seines 60. Geburtstags wiederzusehen. Vielleicht treffe ich dann auch die anderen ehemaligen Kollegen seines Lehrstuhls wieder oder Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler anderer Universitäten und Hochschulen, die ich damals regelmäßig auf Konferenzen traf.

Helmut Mayer wünsche ich alles Gute und noch sieben erfolgreiche, produktive Jahre, bis er in den Ruhestand geht.

## Literatur/Quellen

BARTELTSEN, J., MAYER, H., HIRSCHMÜLLER, H., KUHN, A. und MICHELINI, M. [2012]: *Orientation and Dense Reconstruction of Unordered Wide Baseline Image Sets* – In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Jhrg. 2012, Heft 4, S. 421-432. ISSN: 1432-8364*

BRACCI, F., DRAUSCHKE, M., KÜHNE, S., und MÁRTON, Z.-C. [2018]: *Challenges in Fusion of Heterogeneous Point Clouds* – In: *REMONDINO, F., TOSCHI, I. und FUSE, T. (Hrsg.): ISPRS TC II Mid-term*

*Symposium „Towards Photogrammetry 2020“, 4-7 June 2016, Riva del Garda, Italy. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2, S. 155-162*

- BRANDENBURGER, W., DRAUSCHKE, M. und MAYER, H. [2013]: *Cornice Detection Using Facade Image and Point Cloud* – In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Jhrg. 2013, Heft 5, S. 511-521. ISSN: 1432-8364*
- DRAUSCHKE, M. und MAYER, H. [2010]: *Evaluation of Texture Energies for Classification of Façade Images* – In: *PAPARODITIS, N., PIERROT-DESEILLIGNY, M., MALLET, C. und TOURNAIRE, O. (Hrsg.): ISPRS Technical Commission III Symposium PCV 2010 – Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis, Saint-Mandé, France, 1-3 September 2010. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 3A, S. 257-262. ISSN: 1682-1750*
- DRAUSCHKE, M., SCHUSTER, H.-F. und FÖRSTNER, W. [2006]: *Detectability of Buildings in Aerial Images over Scale Space* – In: *FÖRSTNER, W. und STEFFEN, R. (Hrsg.): Symposium of ISPRS Commission III “Photogrammetric Computer Vision PCV’06”, 20-22 September 2006, Bonn, Germany. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 3, S. 7-12.*
- HIRSCHMÜLLER, H. [2005]: *Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Gloabl Matching and Mutual Information* – In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): Proceedings, 2005 IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2005, 20-26 June 2005, San Diego, CA, USA. IEEE, Piscataway, Volume 2, S. 807-814*
- KUHN, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHARSTEIN, D. und MAYER, H. [2017]: *A TV Prior for High-Quality Scalable Multi-View Stereo Reconstruction* – In: *International Journal of Computer Vision, Band 124, Heft 1, S. 2-17. ISSN: 0920-5691*
- KUHN, A., HUANG, H., DRAUSCHKE, M. und MAYER, H. [2016]: *Fast Probabilistic Fusion of 3D Point Clouds via Occupancy Grids for Scene Classification* – In: *HALOUNOVA, L., SCHINDLER, K., LIMPOUCH, A., PAJDLA, T., ŠAFÁŘ, V., MAYER, H., OUDE ELBERINK, S., ROTTENSTEINER, F., BRÉDIF, M., SKALOUD, J. und STILLA, U. (Hrsg.): XXIII ISPRS Congress, Commission III, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. III-3, S. 325-332. ISSN: 2194-9042*
- MAYER, H., HUANG, H., KUHN, A., MICHELINI, M., NGUATEM, W., ROTH, L., SCHMITZ, M. und DRAUSCHKE, M. [2017]: *Bilder vom Boden und vom UAV: Orientierung, dichte 3D*

*Rekonstruktion und funktionale Modellierung – In: KERSTEN, T. P. (Hrsg.): Kulturelles Erbe erfassen und bewahren – Von der Dokumentation zum virtuellen Rundgang. 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 8.-10. März 2017 in Würzburg. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 26, S. 122-128. ISSN: 0942-2870*

MAYER, H. und REZNIK, S. [2006]: *MCMC Linked with Implicit Shape Models and Plane Sweeping for 3D Building Façade Interpretation in Image Sequences – In: FÖRSTNER, W. und STEFFEN, R. (Hrsg.): Symposium of ISPRS Commission III “Photogrammetric Computer Vision PCV’06”, 20-22 September 2006, Bonn, Germany. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 3, S. 130-135. ISSN: 1682-1750*

NGUATEM, W., DRAUSCHKE, M. und MAYER, H. [2016]: *Automatic Generation of Building Models with Levels of Detail 1-3 – In: HALOUNOVA, L., SCHINDLER, K., LIMPOUCH, A., PAJDLA, T., ŠAFÁŘ, V., MAYER, H., OUDE ELBERINK, S., ROTTENSTEINER, F., BRÉDIF, M., SKALOUD, J. und STILLA, U. (Hrsg.): XXIII ISPRS Congress, Commission III, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLI-B3, S. 649-654. ISSN: 1682-1750*

NGUATEM, W. und MAYER, H. [2017]: *Modeling Urban Scenes from Point Clouds – In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): Proceedings, 2017 IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2017, 22-29 October 2017, Venice, Italy. IEEE, Piscataway, S. 3857-3866. ISSN 2380-7504*

WENZEL, S., DRAUSCHKE, M. und FÖRSTNER, W. [2007]: *Detection and Description of Repeated Structures in Rectified Façade Images – In: Photogrammetrie - Fernerkundung – Geoinformation, Jhrg. 2007, Heft 7, S. 481-490.*

**Anschrift des Verfassers:**

Dr.-Ing. Martin Drauschke  
Bundesamt für Justiz  
Adenauerallee 99 – 103  
53113 Bonn  
Martin.Drauschke@bfj.bund.de

# Global Navigation Satellite Systems (GNSS): The Utmost Interdisciplinary Integrator

## Summary

Currently four global satellite navigation systems are under modernization and development: The US American GPS III/IIIF, the Russian GLONASS K/KM, the European Galileo (2nd generation) and Chinese BeiDou III systems. Since 2018 a new development called LEO-PNT (Positioning, Navigation and Timing from the low earth-orbit) got more and more momentum. Currently, about 10 LEO-PNT proposals are under discussion.

In the paper the interdisciplinary contributions of different scientific areas to GNSS are assessed. It is outlined that GNSS is not only a technical system but also a basic element of mobile computing high-tech market. At the same time a GNSS has the role of a force enabler in security related applications. Technology, market and security policies are interdependent and are sometimes in a relationship of tension.

The goal of the paper is to describe the overall systemic of GNSS from a holistic point of view. The paper also addresses the human factor side of GNSS. The requirements on human resources in GNSS are at least two-fold: On the one hand, very specialized engineers are needed; on the other hand, generalists are necessary who are able to understand the system aspects. Decision makers in institutions and industry need special knowledge in technologies, economics and political strategies. Is the current university system able to educate and prepare such generalists? Are specialized master courses for GNSS needed? Are external training courses necessary?

**Keywords:** Global Navigation Satellite Systems, GNSS, Interdisciplinary Nature, Systemic of GNSS, GNSS in the Information World, GNSS in the Academic Education System

## 1 Introduction

GNSS receivers have penetrated our daily life (about 6.5 Billion GNSS chips in the world market). More or less all high-tech multi-media devices like mobile phones, mobile computing devices, automotive devices and many consumer products are equipped with a GPS chip. More over all-classical navigation applications like aircraft navigation and landing, navigation of ships in harbors and the open sea but also the location of near-earth satellites, e.g. imaging satellites are based on GNSS. The US Global Positioning System (GPS) or more general the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) provide a unique source for position determination and timing for various users and are in general free of charge. Highly integrated GNSS silicon chips became very cheap over the years. They look as small technical marvels. Nevertheless, they became only possible by the mastering of very complex technology areas and implementation of infrastructures.

The roots of satellite navigation go back to the beginning of the space age. Only five years after the flight of Sputnik I in 1957 space was already utilized for telecommunication [1] (Communications Satellite Act of President J.F. Kennedy, 1962) and the built-up of the Doppler navigation system TRANSIT in the US. Similar developments were put into place in Russia. In 1973 the GPS NAVSTAR program [2] was launched in the USA and only a few years later the Russians started to develop GLONASS. Clearly, this big initial effort to implement in the 70ties such complex systems was driven by the cold war and the competition between the western and eastern hemispheres. GPS and GLONASS were initially purely military systems. After the Korean Airlines (KAL 007) disaster in 1983 GPS (and later GLONASS) was made available for the civil world. Thus, the early satellite navigation systems mutated to dual use systems what they are still today. Dual use systems have the standalone feature that the same system can be used for civil and to military applications. In the early 1960s Europe made first steps to built-up and organize its own space sector (European Space

Agency ESA was founded in 1975). Satellite navigation was not on the agenda in these days. At that time China was at the end of the so-called Cultural Revolution. First activities in space were also visible in China (the first earth-orbiting satellite was launched in 1970). A quarter of a century later the situation changed in Europe and China because the benefits of satellite navigation got more and more visible in the US: Desert Storm in 1991 was a clear break-through for GPS in military applications. At the same time a civil market was already present for surveying GPS sets, maritime receivers and the first land vehicle devices. Thus, rather lately it was discovered that satellite navigation is on the one hand strategic technology and on the other hand it is a market enabler for basically all civil PNT (Positioning Navigation and Timing) issues. The developments of Galileo in Europe [3], [4] and BeiDou in China were started. Many other activities in the so-called Space Based Augmentation Systems (SBAS) and regional systems (QZSS, Japan) were kicked-off. In nowadays, the interesting point is that we see with LEO-PNT a move back to satellite navigation in the low earth-orbit [6].

## 2 Interdisciplinary nature of GNSS

GNSS is an interdisciplinary field par excellence. The reason is on the one hand that several key technology areas are involved. On the other hand these key technology areas do not belong to a single academic faculty or a single profession.

### 2.1 Key technology areas

Satellite navigation like we know it today became only possible over the last 50 years by the integration of several key technology areas: First, we need the ability to build robust satellite platforms with a lifetime of 12-15 years. And we need access to space, i.e. we need adequate launchers and space transportation systems to reach the MEO (20000 km) orbit. The delays in the Ariane 6 development leads to severe impacts on Galileo constellation and FOC (Full Operational Capability) provision. Secondly, we need the ability to build precise atomic clocks (Rubidium, Cesium, H – Maser, optical clocks in future) and operate them in the satellite orbit for many years. GPS was the first space system where spread-spectrum digital signal processing based on BPSK (Binary Phase Shift Keying) was implemented. Thus, thirdly we need the digital technology on hardware and software level to generate the baseband signals and to modulate these

finally on one or more carrier frequencies. This includes the design of electronic and digital payload components. In the design and production of GNSS receivers in the user segment leading-edge semiconductor technology and fast digital signal processing on high – performance microprocessors is a key requirement. Not to forget the ability of high precision orbit determination and prediction (decimeter – accuracy over 24 h) and the modelling and prediction of the deterministic and stochastic drift of atomic clocks. Other important key areas are the propagation of electromagnetic waves on L – band and other frequencies in the atmosphere of the earth. Corrections for time and frequency based on general and special theory of relativity have to be applied. Last but not least the theory and practice of precise geodetic and astronomical reference frames and time systems is an important element of GNSS.

### 2.2 Disciplines involved

On the technical side of GNSS it is not so difficult to identify the academic and technical disciplines which are involved. However, GNSS has not only a technical dimension but also several non-technical dimensions.

*Aerospace engineering:* All aspects that are concerned with satellite platforms, the launcher system the constellation built-up and the space operations belong to aerospace engineering. GNSS is not so different from other space systems e.g. like other low-earth orbiting constellations e.g. IRIDIUM, GLOBALSTAR, Starlink, etc.

*Communications engineering:* The generation and modulation of digital pseudorandom noise sequences on electromagnetic waves, the transmission of these signals, and the de-modulation in the user receiver by various methods of time-series processing like auto-correlation is covered by the field of communications engineering.

*Electrical engineering:* In the navigation payload of the satellites but also in the GNSS receivers of the user segment various electrical components are used. A very important field for small sized and low – cost GNSS chips is the field of semiconductor materials, design and processes. The field of electromagnetic wave propagation between satellites and users and the reflection of signals on smooth and rough surfaces (multipath) and appropriate propagation channel models belong classically to electrical engineering.

*Informatics:* In the GNSS space, ground and user segments there are many tasks related to the field of information technology. GNSS functions are largely



driven by software. Therefore, software engineering with respect to software standards, certification and cyber-security is an important issue. Additionally, the development of processing systems making use of signal and micro-processors is a challenge. Software quality assurance, coding theory and cryptography should not be forgotten.

*Physics:* Physicists play an important role in GNSS. A basic task of physicists is to design and build precise atomic clocks for extremely precise time keeping and frequency generation. Precise time and frequency also requires the exact knowledge of A. Einstein's space-time continuum and the derivation of various correction formulae and schemes, because GNSS clocks are in space on different gravity potentials and speed relative to a user on the earth surface. Atmospheric physicists cover the models and processes of the ionosphere and the troposphere.

*Mathematics:* Mathematics is linked to various aspects in GNSS. Very obvious is the field of orbit determination and orbital mechanics. Precise mathematical acceleration models and precise numerical integration methods of differential equations are needed. Another topic is the optimal parameter estimation in the orbit determination process by use of linear or non – linear estimation methods (Kalman filter & least-squares). Some overlap to theoretical mechanics exists.

*Geodesy:* The issues of precise global reference coordinate systems, the geodynamic aspects of the system earth, but also the navigation algorithms and least – squares adjustment down to carrier phase ambiguity resolution in mixed real valued and integer valued estimation problems is covered by geodesy. Sometimes the role of geodesy is underestimated: In the US currently a lack of geodesists (Geodesy Crisis) is in the focus [7].

*Product and service design:* Finally, the receivers or products for the end – consumers have to be developed and designed with an up-to date form factor (size, weight, power & cost). Engineers from the main transport modes (aviation, maritime, land) are needed to install the GNSS related systems and products on the specific platforms. Standardization, verification and testing, safety analyses is an additional area.

Additionally to the classical technical areas several partly non – technical, more general and soft – skill abilities are necessary:

*System engineering:* At first people are needed who are by themselves no specialists in the above listed domains but have an overview about the interconnections and the interdependences between

the GNSS sub-systems. These people are often called system engineers.

*Project management, contracts and commercial issues:* Because the built – up of the space and ground infrastructures in a GNSS (the same holds for the sub-systems) are large projects for several 100 M Euros, project managers are needed who are able to keep control of the complex work package structures, the time schedules and resources. They are supported by controllers who have a commercial background. Because various contracts have to be signed in the development of the space, control and user segments also specialized lawyers are involved.

Finally, people are needed who are pioneering services and put them to practice.

### 2.3 Additional complexity issues

The description of key technologies shows already that GNSS has various elements of knowledge areas. However, even in a specific knowledge domain GNSS is introducing higher complexity issues. Reasons are the following: GNSS does not consist of a single satellite, but a constellation of about 30 satellites per system. Very accurate metric distance measurements are necessary. This poses extremely high precision requirements on time and frequency generation. The dual use system issue introduces an interface between civil and military space flight. The user requirements (maritime, land, air, space) are very heterogeneous and difficult to harmonize. The usable frequency spectrum in L – Band is scarce. Because GNSS is always a strategic element of security policies governmental agencies are involved. This is also because the public implementation and operational costs are high (>10 B€ per 10 fiscal years plus 500 M€/year for operations). Finally, yet importantly the value chain, i.e. the cycle from infrastructure to products is very complex and difficult to understand.

### 3 Role of GNSS in the information world

The GNSS development is in some aspects similar to the history of the internet. In the 1960's the US Department of Defense awarded some contracts to develop packet network systems. The ARPANET became the first network, which made use of the internet protocol. After the military initiative university researchers became involved in the internet development and step by step over the years it evolved to the global digital communication layer for multi – media applications. GPS was originally designed as a navigation system to enhance military operations: The early motto of GPS [2] was: “drop five bombs in the same hole and build a cheap set that

navigates”. Now GNSS is the basic infrastructure for all information technology applications where geo-location and timing is needed. In Europe it is known that 7-10% of the social cross product in the European Union depends already on PNT with a growing tendency.

Some examples are intelligent high - way and telematics systems, including car-to-car communication, driver assistance systems and autonomous driving.

The use of GNSS is the simplest way to synchronize computer networks, power distribution networks and base station networks of telecommunication.

Usually a GNSS sensor provides PNT for Location Based Services and gaming applications.

Civil and military security systems e.g. like C<sup>3</sup>I (Command, Control, Communications and Intelligence) or network centric warfare (networking of sensors, command, weapon delivery) are using GNSS on the geo-location side.

The space time context in the new fields of “Big Data” and Artificial Intelligence is provided by GNSS.

A good example (out of many others) for such a GNSS and communication based information infrastructure is the Automatic Identification System (AIS) of the maritime community [5]:

Since the Safety of Live Convention (SOLAS) of the IMO (International Maritime Organization) is in place Chapter V of SOLAS required all ships with a gross tonnage > 300 grt to be fitted with an AIS (Universal Automatic Identification System) till 12/2004. Universal AIS (or AIS, as it is commonly known) is an emerging ship and shore based broadcast system, operating in the VHF maritime band. Its characteristics and capabilities will provide efficient vessel traffic management. The AIS can be understood as the marine collision avoidance system. It is an outstanding new tool for enhancing the safety of navigation. An AIS station is a VHF radio transceiver capable of sending ship information such as identity, position, course, speed, length, ship type and cargo information etc., to other ships. Information from an operational shipboard AIS unit is transmitted continuously and automatically without any intervention of the ship’s staff.

An AIS Station is built-up by one VHF transmitter, two VHF SOTDMA (Self Organizing TDMA) receivers, one VHF DSC (Digital Selective Calling) receiver and marine communication link to ECDIS (Electronic Chart Display). Additionally, a GNSS receiver for time slot synchronization is used. The

AIS station is used on land borne and ship borne. The ship borne AIS component consists of the AIS station, a PC and ECS/ECDIS display and additionally of an external GNSS receiver plus compass and log. A typical range of the AIS at sea is between 20 to 30 nautical miles depending on the antenna height.

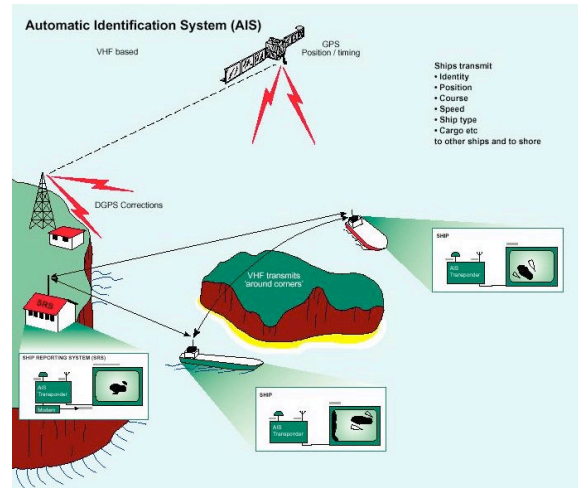


Figure 1: Concept of The Automatic Identification System (AIS) in maritime coastal navigation [5].

#### 4 The GNSS implementation and value chain

To get a complete picture on human resources and academic education requirements, it is additional necessary to get aware of the GNSS implementation and value chain. Latter is sometimes not clearly understood by decision makers in governments, institutions & industry.

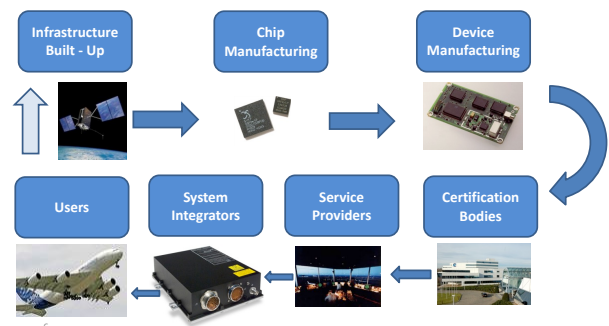


Figure 2: The GNSS value chain.

The time scale for the GNSS value chain posed in Figure 2 is of long - term nature and lies between 10 and 15 years. It is a basic problem to have high – quality human resources ready at the different stages of the chain. In the European Galileo development, this was not the case. Human resources from other domains were acquired and directed to the European Satellite Navigation programs. These human resources came typically from the

telecommunication field, space system domain, and large-scale infrastructure projects in industry and public traffic management. Many staff members and fellow workers at that time were no specialists in satellite navigation. While solving their specific problems they had to build-up their learning – curves. The concept was on the basis of “learning - by-doing”. Thus, it was no surprise that many political, technical and commercial/funding decisions were sub-optimal.

#### *User requirements*

In principle the value chain is a closed loop. It starts at the beginning with user requirements. E.g. for aviation GNSS users the so-called required Navigation Performance Parameters (RNPs) are used. In aviation these requirements formulate the horizontal and vertical accuracy requirements for different phases of flight (en-route, non-precision approach, precision landing), the integrity, availability and continuity requirements.

#### *Infrastructure build-up*

The user requirements are mapped to mission, system and sub-system requirements for the satellite navigation system. After this, the space and ground infrastructures are developed and produced. Finally, the infrastructure and the GNSS have to be validated and verified against the different requirement levels. Typically, the process of infrastructure build-up needs several years of time.

#### *Chip manufacturing*

The development and manufacturing of GNSS silicon chips starts relatively late in contrary to what might be expected. Usually, GNSS chips are developed by public funding, private funding or a mix of both. Because the development of chips and the manufacturing processes for highly integrated semi-conductors is very expensive, private companies and investors answer with a certain waiting period or latency on the infrastructure set-up. Private money is only invested, if trust is in place for the future of the specific GNSS. Typically, in the case of the Russian GLONASS system in the 1990s western chip manufacturers were very reluctant to invest in combined GPS/GLONASS receivers because of the economic crisis in Russia and the uncertain future of GLONASS. A similar effect could be seen for Galileo in Europe.

#### *Device manufacturing*

GNSS chips are integrated on printed circuit boards (PCBs) together with other microprocessors and storage components. The way this integration is performed depends mainly on the specific user groups like aviation receivers, maritime receivers, space receivers and in many different designs for land navigation (car navigation receivers, mobile phones, wearables, surveying, etc.).

#### *Certification bodies*

In some specific user segments which belong to safety critical navigation the GNSS receivers have to be compatible with many certification standards. Usually governmental institutions like the Federal Aviation Administration (FAA) in the US or the EASA (European Aviation Safety Agency) are necessary to develop all the standards, processes and test procedures to certify e.g. aviation receivers.

#### *Service providers*

In some applications, service providers will be involved in the implementation chain. Such service providers build-up their own infrastructure to support GNSS operations. We may think here e.g. on fleet-management centers or differential correction services (DGPS) to enhance the positioning accuracy.

#### *System Integrators*

System integrators are necessary to integrate GNSS receivers in avionics systems, in bridge equipment of large ships or in car navigation systems together e.g. with electronic maps, dead reckoning sensors, etc.

#### *Users*

Last but not least the user comes into play. He is performing his navigation mission by making use of the GNSS infrastructure and the GNSS based navigation systems. This is closing the loop of the value chain. The problem is that since the GNSS development started-off with the user requirements usually more than a decade of time has passed. Because of the everlasting short innovation cycles (< 3 years) the user requirements may have changed after such a long time. This leads to the demand by the users that the user requirements have to be changed or up-dated. Because satellite-life time is on the order of 12 to 15 years it is not instantaneously possible to up-date the space and ground infrastructures. The standard approach to cope with changing user requirements is to work with satellite blocks, e.g. GPS Block I, II/IIA/IIR/III, which are modernized from batch to batch. Today higher flexibility for software functions will be integrated into the navigation payloads.

## **5 Human resources and education**

The requirements on human resources in GNSS are at least two-fold: On the one hand, very specialized engineers are needed; on the other hand, generalists are necessary, who are able to understand the overall system aspects. Decision makers in institutions and industry need special knowledge in technologies, economics and political strategies. Is the current university system able to educate and prepare such generalists? Are specialized master courses for

GNSS needed? Are external training courses necessary?

### **5.1 Status of the current GNSS academic education system**

Although GPS development started in the 1970s in military programs, academic research in GNSS is visible with delay since the early 1980s. A pioneering role was taken over by geodesists because they got aware of the high precision potential of the GPS carrier-phase observable. They discovered that centimeter level accuracy may be obtained by processing the recovered carrier-wavelength of 0.2 m. The US National Geodetic Survey (NGS) in Greenbelt, MD was among the first surveying institutions to assess the use of GPS for precise point positioning. Several European professors joined the NGS for a sabbatical year in the 80s. When coming back to their home universities they were among the first to establish GPS in research and teaching in the European university system. The same happened in continental US, Canada, Japan and Australia. Thus, geodesy and surveying somehow was the first academic discipline which integrated GPS elements in the study courses. Later when aviation, land and maritime aspects came into the scope of GPS other faculties like aerospace engineering and electrical engineering joined this very compact science community. The roots of the early days in academic GPS research are still visible: Among others, the sustained players on university level in the PNT community are Stanford University, Ohio State University, Ohio University, University of Colorado, University of Calgary, University of Nottingham, Technical University Delft, Technical University Graz, University of New South Wales, University of Hannover, and my own university. These historical core players have been joined by a lot of new university institutes during the last decade. In general, the situation at these universities is that teaching in GNSS is integrated into the more classical study courses like e.g. aerospace engineering. GNSS is usually one special teaching area among many others like aircraft design, space systems technology, structural mechanics, etc. As pointed out earlier, GNSS has been of interdisciplinary nature comprising many key technology areas. This leads to the fact that GNSS research and teaching is distributed among all the different faculties involved. Somehow, this is a proliferated situation which is not fulfilling the demands on human resources in institutions and industry.

Let us take a brief look to the space sector:

In the space sector down-stream market GNSS is with 35% revenue very important (satellite based communication direct broad casting services is 64% and earth-observation 2%). Considering these numbers it is very surprising that some study courses in aerospace engineering completely neglect satellite navigation.

### **5.2 Future looking options in academic training for GNSS**

On the human resources side of GNSS a new professional academic is needed: This specialist could be called "GNSS engineer". Typically, after a B.Sc. in one of the key technology areas he should have an interdisciplinary academic training. He should be able to work on the level of system engineering, but, if it is required also in a special technical field of satellite navigation. As outlined in chapter 2 it is quite straightforward for insider professors to define a study course and the respective curriculum. The level of such a study course would be a M.Sc. in "Satellite Navigation". Thus, it could be asked: Where is the problem? Many new and specialized master courses are and were established in the classical academic faculties.

### **5.3 Integration of GNSS engineering master course into classical faculties**

This concept would be the most direct approach. It would be important to integrate such a satellite navigation master in one of the larger engineering faculties like information technology or electrical engineering. For instance a faculty of geodesy would be too small. The financial issue for such a master course is solved, because it would be fully integrated into the university infrastructure. However, the problem could be the awareness of other faculty members on the importance of GNSS. Usually, larger faculties try to cope with high priority with some megatrends in their disciplines like, e.g. green energy. A decision process is necessary to appoint specialist professors and the supporting staff for a satellite navigation master. The minimum number of students in such master should be about 20 freshmen. Although, currently there is a high demand on satellite navigation engineers in Europe in none of the big German universities an implementation of such a M.Sc. has happened because believe is that the area of satellite navigation is too special.

#### 5.4 Integration of GNSS engineering into classical faculties as an executive master course

A first alternative approach would be to implement a so-called executive master. This master is only partly integrated into a faculty, mainly with respect to the curriculum side. The students in this case have already an employment in agencies or industry. The executive master consists of presence phases at the university and idle phases where the students are doing their job in industry or agencies. Latter will pay a certain amount of fee to the university to solve for the budgetary issue. These fees for the employers could be supported by sponsoring. The disadvantage for this approach is that the organizational and contractual effort is very high. Very well-known is the SpaceTech Master Course organized by TU Graz and formerly by TU Delft.

#### 5.5 Implementation of GNSS international master courses

This concept starts from the assumption that no university on a national level would be able or willing to establish a specialized master course on GNSS by its own. The idea is then to group a certain number of leading professors from different international universities together. An organizing university is providing the infrastructure (curriculum issues, lecturing rooms, full board). The various financial issues like travel expenses for the lecturers have to be solved. This approach requires a contract between the universities involved which is difficult to obtain. Alternatively, a different funding layer could be used. In Europe an international master was established at ENAC in Toulouse by funding of the European GNSS Agency (GSA).

#### 5.6 External GNSS training courses

This possibility is more or less a standard. The concept is that employees are taking part in timely limited training courses (1 to 3 days) besides their jobs. On worldwide basis a lot of public and private providers offer such courses in the GNSS field. Mentioned should be the ESA Summer School on GNSS, NavTech Seminars (US), or specific courses at Carl-Cranz Gesellschaft e.V. in Germany.

### 6 Conclusions

The importance of GNSS for the modern digital infrastructure is outlined by the following facts: ~10% of the European gross product depends on PNT (Positioning Navigation Timing), 6.5 billion

mass market GNSS chips are fielded in civil mobile communication and navigation devices. The number of military GPS receivers in comparison is below 1 million units in US plus NATO. The GNSS core market is about 80 billion \$ US per year. This is accompanied by an enabled market of 200 billion \$ per year (the market which indirectly is using GNSS technology for derived products and services).

The availability of GNSS is taken by the information industry and many service providers as granted:

However, several key technology areas had to be mastered since 1950. Launcher systems, satellites and payloads, precise atomic clocks in space including relativistic corrections, precise orbital mechanics, estimation theory and filtering and coordinates reference frames, propagation of electromagnetic waves in the earth atmosphere, very large-scale integrated semiconductors, fast signal processing algorithms, powerful signal and microprocessors. For building up the space and ground infrastructures the ability of project management and system engineering is necessary, but also the pioneering of applications and the development of markets and business opportunities.

Thus, a full operational GNSS might be seen as an integral of many interdisciplinary fields: Fundamental sciences (physics, mathematics), engineering sciences (space engineering, electrical engineering, semiconductor development, and computer engineering and software development, geodesy, communication and product engineering), socio economic strategies and evaluation methods.

Unfortunately, the implementation of GNSS engineering and related fields in the academic world is not optimal. GNSS does not clearly belong to one of the big technical faculties. Several options for a GNSS related education, e.g. a GNSS M. Sc. are discussed. The best and realistic way to implement a high – quality academic education in GNSS is not easy to see.

### References

- [1] *Harvard Law Review, The Communications Satellite Act of 1962 (December 1962). Vol. 76 Issue 2, pp. 56-168, 13p; (AN 15226548)*
- [2] *Bradford W. Parkinson, Introduction and Heritage of NAVSTAR, The Global Positioning System, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163, AIAA Publication, Washington DC, 1996, pp. 3-28*
- [3] *Eissfeller, B., T. Schüler, Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO, Beitrag zum 66. DVW-Seminar "GPS und GALILEO", 21.-22.*

Februar 2006, Darmstadt, pp. 17-40, DVW-  
Schriftenreihe Band 49/2006, ISSN 0940-4260,  
Augsburg, Wißner-Verlag

- [4] Eissfeller, B., M. Irsigler, J. Avila-Rodriguez, E. Schüler, T. Schüler, *Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO – Entwicklungsstand, AVN - Allgemeine Vermessungsnachrichten*, No. 02/2007, pp. 42-55, Wißner-Verlag, Germany, Wißner-Verlag
- [5] IALA, *Aids to Navigation (Navguide), Edition 4, 2001*
- [6] Eissfeller, B., T. Pany, D. Dötterböck, R. Förstner, *A Comparative Study of LEO-PNT Systems and Concepts, Proceedings of the ION 2024 Pacific PNT Meeting, April 15-18, Honolulu*, p. 758 – 782
- [7] Bevis, M., Zilkoski, D., Davis, J., Sandwell, D., Hudnut, K., Jekeli, C., Salman, R., Herring, T., Hilla, S., Freymueller, J., Shum, C. K., Carter, W., Glennie, C., Bock, Y., & Factor, J. (2022), *America's Loss of Capacity and International Competitiveness in Geodesy, the Economic and Military Implications, and Some Modes of Corrective Action.*  
[https://aagsmo.org/wp-content/uploads/2022/02/TheGeodesyCrisis\\_Final.pdf](https://aagsmo.org/wp-content/uploads/2022/02/TheGeodesyCrisis_Final.pdf)

**Anschrift des Verfassers:**

Bernd Eissfeller, Dr.-Ing. habil., Exzellenter Emeritus  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85579 Neubiberg  
bernd.eissfeller@unibw.de

# Studying Geodesy and Geoinformatics - a German university perspective<sup>1</sup>

## Abstract

This paper describes the discipline of geodesy and geoinformatics with a focus on university studies and career opportunities. It is shown how the disciplines contribute to the solutions of major societal challenges such as sustainable development, mobility and global change. Then, the structure of German universities is shortly explained, followed by an overview of where in the country the discipline can be studied. Finally, the example of Leibniz University Hannover, one of the prime centres of excellence in the field, is described in more detail. We thus hope to encourage young talents to consider this exciting field of studies for their future career.

## 1 Introduction

### 1.1 Geodesy and Geoinformatics

Traditionally, *geodesy* was defined as the „the science of the measurement and mapping of the Earth's surface” (Helmert, 1880). During the 20<sup>th</sup> and the first decades of the 21<sup>st</sup> century, this definition has been extensively enlarged, mainly due to the development of space technology, digital sensing systems, and ICT: information and communication technology. Today, while in the English and French speaking world, the term *geodesy* is linked to the observation of the Earth as a whole and treats questions about the figure and rotation of the Earth, global geodetic reference systems and the gravity field, in the German language a more comprehensive understanding of the term is commonplace, incl. also land surveying, photogrammetry, remote sensing, cartography and land management together with its modern developments such as navigation, computer vision, spatial databases, augmented/virtual reality, visual analytics and geospatial artificial intelligence (GeoAI). This wider understanding of *geodesy* is sometimes underlined by the term *geodesy and geoinformatics* or *geomatics* (G&G). It is this more general field which is the background of this paper, in which possibilities to study geodesy in Germany are explored with the specific example of the author's home university, Leibniz University Hannover.

*Geodesy* is an engineering discipline with strong relations to mathematics and natural sciences on the

one side, and to geo- and social sciences on the other (see Figure 1). According to a definition published by the German Geodetic Commission DGK, this discipline “acquires data about the Earth and its various spheres of life, including their changes in different spatial and temporal scales; and it analyses, interprets, visualizes, documents and evaluates the captured data. Finally, geodesy models, simulates and designs developments based on different scenarios and supports decision processes. In this way, geodesy creates an indispensable highly accurate, as well as up-to-date and reliable data and information base about the Earth and distributes this information via efficient geospatial data infrastructures to other disciplines. Furthermore, geodesy draws conclusions in an inter-disciplinary context (...) and designs strategies for sustainable development and change management” (Heipke 2013, p. 1).

It is often said that 80% of all decisions have a spatial component. Reliable and up-to-date geoinformation, which is the result of geodetic activity, is considered to be an essential digital infrastructure of a modern nation, equally important as traffic, electricity, telecommunication, water and sewage infrastructure. It is dispensable for transparent decision making in government, industry, society, as well as for sustainable development. Geodesists are custodians of global, national and local spatial data infrastructure, as also expressed in the resolution “A Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development”, recognising the importance of a globally coordinated approach to geodesy and adopted by the United Nations General Assembly on Feb. 26, 2015 (UN-GGIM, 2015). This resolution “outlines the value of

---

<sup>1</sup> Reprint from Heipke C., Schön S., 2024: *Studying Geodesy and Geoinformatics - a German university perspective*, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., X-5-2024.

ground-based observations and remote satellite sensing when tracking changes in populations, ice caps, oceans and the atmosphere over time. Such geospatial measurements can support sustainable development policymaking, climate change monitoring and natural disaster management, and also have a wide range of applications for transport, agriculture and construction” (UN-GGIM, 2015). Consequently, *geodesy* is an essential component of many of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 UN Agenda for Sustainable Development (UN, 2024).

Recent developments of geodesy have been mainly triggered by

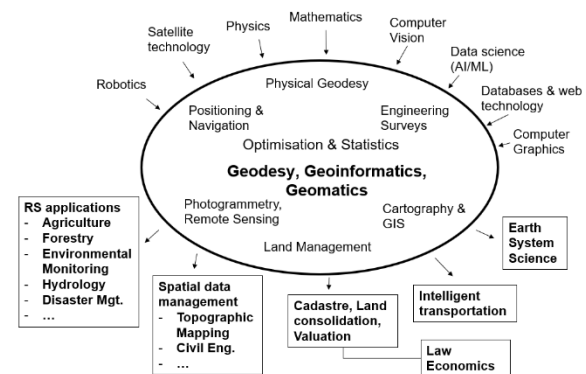
1. Fundamental break-throughs in research, e.g., when using quantum sensors in Earth observation, in relativistic geodesy, in the automated acquisition of massive amounts of geospatial data for digitisation, in machine learning for the analysis and use of these “big data”.
2. The pressing need for precise geodetic acquisition of local and global change processes in the current climate crisis, e.g., as a base for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) reports and for achieving the UN SDGs.
3. The developments of new digitisation concepts (e.g., national geodata infrastructure, Building Information Modelling, and Industry 4.0) as well as new mobility concepts in the automotive context with decisive importance of geodata and their analysis.

Today, digitisation, mobility and navigation, Earth system sciences, climate change and environmental challenges as well as spatial planning and high precision geometric and physical measurement and data processing are at the core of geodesy. Geodesists analyse spatial information such as imagery, laser data, GNSS signals and Earth gravity measurements, which are acquired using static and mobile platforms, flying drones and satellites equipped with various multi sensor systems. Analysis and interpretation of the acquired data is increasingly based on artificial intelligence and machine learning. Applications can be found in areas as diverse as topographic mapping, industrial quality control, 3D city modelling, autonomous driving, environmental monitoring and the determination of sea level rise.

This enlarged activity implies broader professional perspectives. Geodesy has thus become significantly more attractive, among others by integrating diverse basic and more application-oriented subjects – mathematics, physics and computer science on the one side, and measurement technology,

geoinformatics, earth system sciences and land management on the other, to name only a few, see also Figure 1. A Master’s degree in *geodesy* currently offers excellent career opportunities in a wide field of exciting and well-paid jobs all over the world, in private industry, in research and development as well as in government and public service (see also Arbeitsplatz Erde, 2023). For instance, graduates of the geodesy programme (see Figure 2)

- develop navigation and software systems,
- design high precision 3D measurement and evaluation systems,
- run their own business as a Chartered Surveyor,
- create and sell geoinformation services,
- implement manufacturing and quality control,
- guide construction work and the extraction of raw materials,
- help the automotive industry to build safer and smarter cars, or
- carry out research in aerospace technology, geophysics and related fields.



**Figure 1:** Geodesy and its relationship to neighbouring disciplines.

Another promising option is to obtain further scientific qualification by enrolling in the PhD programme of the university.

## 2 The German university system

Developed by Wilhelm von Humboldt (1809/10), the classical German university model historically rests on the unity of research and teaching, the development of personality by scientific argument and the rejection of the idea, that university prepares for a career. This was also the basis of education in engineering and technical subjects, which - as in other countries - emerged in concert with the industrial revolution in



the 19<sup>th</sup> century. Higher technical education started e.g., in Berlin in 1821, in Karlsruhe in 1825, in Stuttgart in 1829, in Hannover in 1831, and in Munich in 1868, while the University of Bonn started a surveying programme as part of the agricultural College in the 1880's.

Following Germany's federal structure, also the university system is a federal one, which implies that some rules differ from one federal state ("Bundesland") to another. In general, students enter university after 12 or 13 years of schooling. Most universities are public institutions, and in those - with exceptions for long-term students and for non-European students in some states – students do not pay for university education as tuition fees do not exist.

During the so-called Bologna process, which started some 20 years ago, universities have adopted the Bachelor / Master system of degrees with a total nominal length of five years, each year being divided into two semesters. At Bachelor level, the language for teaching is mostly German, at Master level, programmes are increasingly offered in English.

In general, two types of universities can be distinguished: research universities and so-called universities of applied sciences ("Fachhochschule"). Research universities offering geodesy programmes are characterised by

- programmes leading to the Bachelor (B.Sc.), Master (M.Sc.) and PhD (Dr.-Ing.) degree,
- an in depth focus on more theoretical education with an emphasize on mathematics, physics and computer science,
- a blend of research and teaching from the beginning (and more so in M.Sc. programme),
- a general programme with specialisation tracks at M.Sc. level, e.g., for robotics, navigation or remote sensing,
- the M.Sc. programme being increasingly taught in English,
- an M.Sc. degree, with a seamless continuation into the PhD programme.

The universities of applied sciences, on the other hand, offer

- a larger variety of programmes: mainly B.Eng., (mainly 3,5 y), sometimes followed by M.Eng. (mainly 1,5 years),
- a stronger focus on practical training with a larger number of projects,
- mostly more specialised programmes, sometimes more than one at the same institution,
- little, if any, teaching of physical geodesy,

- in general, no PhD programme, although exceptions start to emerge.

## 3 Studying Geodesy in Germany

### 3.1 Location and student numbers

Today, a consecutive Bachelor and Master programme in geodesy is offered by 8 different research universities and 12 universities of applied sciences across Germany (see Figure 3); note that while many of the research universities have adopted the name geodesy and geoinformatics to emphasize the increasing importance of computer science in the programme, the course names slightly differ between the different locations. The research universities in alphabetic order are University of Bonn, TU Darmstadt, TU Dresden, HafenCity Hamburg, Leibniz University Hannover, KIT Karlsruhe, TU Munich and University of Stuttgart. In addition, TU Berlin offers a Master programme in the field.

At the level of the universities of applied sciences, geodesy can be studied Berlin, Bochum, Dessau, Dresden, Frankfurt, Karlsruhe, Mainz, München, Neubrandenburg, Oldenburg, Stuttgart and Würzburg.

In the winter semester 2021/22 the number of 1<sup>st</sup> semester students (Bachelor and Master combined) in the research universities was 533, that of the universities of applied sciences was 743 (Fahrer et al. 2023/24), resulting in 20 - 30 students per semester on average. While these numbers vary from location to location and from year to year, it can be stated that geodesy has a rather small number of students per class compared to other engineering programmes such as civil, electrical and mechanical engineering and thus an excellent professor/student supervision relation.

### 3.2 Content at research universities

In the following, the focus will be on research universities. Programmes at these institutions are subdivided into the following subjects (DGK, 2018, see also again Figure 1):

- Engineering Geodesy,
- Positioning and Navigation,
- Physical Geodesy,
- Photogrammetry and Remote Sensing,
- Cartography,
- Land Management,
- Optimization and Statistics.



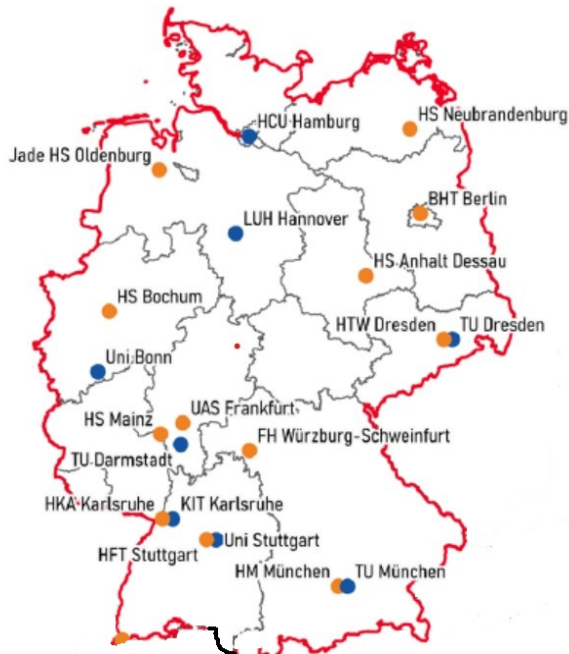
**Figure 2:** Examples of application areas of geodesy and geoinformatics.

At B.Sc. level, all these subjects are part of the programme, in addition to a relatively large number of courses in mathematics, physics and computer science; these courses are typically identical for all engineering students. In particular in mathematics and physics, students are required to have a certain knowledge of the subject before entering university in order to follow the lectures. While it is not mandatory to also know a computing language when starting at university, it is certainly an advantage. Besides lectures, lab sessions are offered, where students apply the knowledge gained in the more theoretical lectures and independently solve problems of different degree of complexity, ranging from maths

puzzles to a surveying campaign of several days. At M.Sc. level more electives are offered, including seminars, where students discuss and present their work, e.g., different approaches published in the international literature, or advanced project work. In this way, students can choose their career path according to their individual interest.

Nevertheless, the curriculum makes sure that students with a geodesy degree have a general understanding of all parts of the fields. It is also common practice that M.Sc. students are part of research projects conducted by the different university institutes; in these projects students are typically supervised by PhD students. As a consequence, the M.Sc. students

are given the opportunity to be exposed to research and thus to the fact, that while open questions exist, answers may not and have to be worked out using theoretical and experimental investigations. The M.Sc. programme



**Figure 3:** Locations to study geodesy in Germany (adapted from Fahrner et al., 2023/24).

ends with a 6 month-long thesis, which is a scientific manuscript, typically of some 60 - 80 pages, documenting the theoretical and experimental work undertaken during the last semester of study, incl. a state-of-the-art chapter, a description of the applied methods and the obtained results as well as an evaluation of the work.

## 4 Studying Geodesy and Geoinformatics at LUH

### 4.1 Geodesy and Geoinformatics at LUH

Leibniz Universität Hannover (LUH) is a public research university and a member of the German TU 9 Alliance of Universities of Technology (TU9, 2024). LUH is also a world-leading centre of higher education in Geodesy and Geoinformatics, offering high quality teaching and research. Students at LUH do not pay any tuition fees, graduates enjoy excellent career opportunities in industry, in public service and in research and development worldwide. Over the last decade, LUH was the most successful research university regarding 3<sup>rd</sup> party funding from the

German Research Foundation, staff has excellent publication records and has employed a number of high-ranking positions in international science management.

The LUH offer in geodesy and geoinformatics (LUH\_G&G, 2024) is a consecutive accredited three-year B.Sc. and two-year M.Sc. programme. The BSc. programme (LUH\_G&G\_BSc, 2024) is taught in German and provides students with the basic knowledge in mathematics, physics and computer science as well as the geodesy related subjects listed above. At the end, students write a B.Sc. thesis, in which they have to demonstrate that they are capable of basic scientific thinking and practical problem solving.

### 4.2 Geodesy and Geoinformatics Master's Programme

The content of the M.Sc. programme (LUH\_G&G\_MSc, 2024) builds upon the B.Sc. subjects and lasts for four semesters. Also, the two-year M.Sc. programme is an accredited course, it can be started in autumn (typically around the middle of October) and in spring (normally at the beginning of April). Courses are taught in English and in small groups. International and local students attend the same lectures, making it easy for students from abroad to mingle with German speaking friends and colleagues.

At LUH, three different specialisations are offered:

- Geomatics,
- Navigation and Field Robotics,
- Remote sensing and GIS (scheduled to open in 2025).

Geomatics is basically a continuation of the B.Sc. degree and follows the classical path of the field. Navigation and Field Robotics integrates the more engineering related subjects of geodesy with some of mechanical and electrical engineering as well as robotics, mechatronics and computer science in an interdisciplinary fashion for applications such as autonomous driving and other areas of mobile robotics. Finally, Remote sensing and GIS focusses on the acquisition and processing of geodata, mainly from space and on tackling scientific solving problems in applications such as environmental monitoring, climate change studies and sustainable development, the latter in cooperation with other ge-related disciplines. In all three specialisations, the first semester establishes a general knowledge base, the following two semesters allow for a specialisation

according to the student's interests, followed by one semester for the Master's thesis.

Application to the M.Sc. programme is open to students from across the world with a first degree in surveying, geodesy, geoinformatics or related fields such as computer science, geography, earth science, civil engineering, or physics; furthermore, candidates must demonstrate that they have a sufficient knowledge of the English language. If the level of knowledge in geodesy and geoinformatics cannot be established from the submitted documents, video call interviews are being scheduled to assess the student's ability to follow the M.Sc. courses. Students, who are judged to have the potential to successfully go through the programme, but lack some basic skills, can be admitted provisionally; in this case they have to pass up to three special courses within the first year to gain sufficient knowledge to follow the regular programme. These special courses are offered in each semester and deal with 3D image processing and computer programming, estimation theory and an introduction to physical geodesy and GNSS, respectively. Furthermore, depending on their B.Sc. degree, a slightly different set of modules is being offered to students with different background in order to best suit their needs.

In more detail, the master programme consists of compulsory and elective modules. Six mandatory subjects, one each from Engineering Geodesy, Positioning and Navigation, Physical Geodesy, Photogrammetry and Remote Sensing, Cartography and Land Management, form the compulsory part and ensure that the study programme has the required breadth. In addition, a number of electives can be chosen, where a minimum of two subjects must come from both, engineering and physical geodesy on the one side, and photogrammetry/remote sensing/cartography/land management on the other.

The programme is complimented by seminars, project work, an optional one week-long excursion and a block of studium generale, in which lectures from the whole university catalogue can be chosen to enlarge one's intellectual knowledge. The last semester is devoted to the Master's thesis, worth 25% of the whole programme, in which students must demonstrate that they are capable of solving a scientific problem in adequate depth and of describing the topic. Self-critical scientific thinking and a proper and justified evaluation of the obtained results are key to a good thesis.

Overarching ideas of the M.Sc. programme are to teach concepts, which remain valid for a longer period of time (these are typically the more theoretical ones),

to point out similarities between seemingly disconnected subjects (to give an example, the "curvature" of a grey value function in image processing is of course identical to that of the geoid), to find a good balance between a common geodetic base and the individual preferences of students with respect to specialisations and electives, and to teach problem solving strategies as opposed to only having to learn by heart certain facts. The goal is that at the end of their studies students are equipped with a self-critical scientific mindset which lets them successfully approach new challenges on their own. While this may come at the cost of being immediately able to solve everyday practical problems, experience has shown that in the long-term achieving those goals prepares students much better to a successful career in geodesy and geoinformatics.

International exchange is possible through a number of ERASMUS contracts within Europe, e.g., with Newcastle University/UK, École Nationale de Sciences Géographiques (ENSG) in Paris/France, the Universitat Politècnica de València/Spain, Aalto University in Espoo/Finland, Istanbul Technical University/Turkey, and Budapest University of Technology and Economics/Hungary. Through personal contacts of the staff, students may also have the possibility to attend courses in universities outside Europe. Example destinations have previously included The Ohio State University in Columbus, OH, USA, the University of New Brunswick in Fredericton, the University of Calgary, both located in Canada, and the University of Melbourne, Australia, to name but a few examples. Most students stay for one semester; the foreign country and the foreign culture are an eye-opener, and students take significant profits from the time abroad.

European students can apply until January 15 for the following summer semester and until July 15 for the next winter semester. As non-European students typically need more time, e.g., to obtain a visa, the deadlines are 6 weeks earlier, i.e., on November 30 for next year's summer and on May 31 for the winter (LUH\_G&G\_application, 2024).

### **4.3 Examples of schedules for the different specialisations**

The following figures describe the course schedule for the individual specialisations. Figure 4 shows the one for Geomatics starting in winter semester. Besides the names of the individual lectures also the number of credit points according to the European Credit Transfer System (ECTS) is given, where one point is considered to be equivalent to 30 h or work

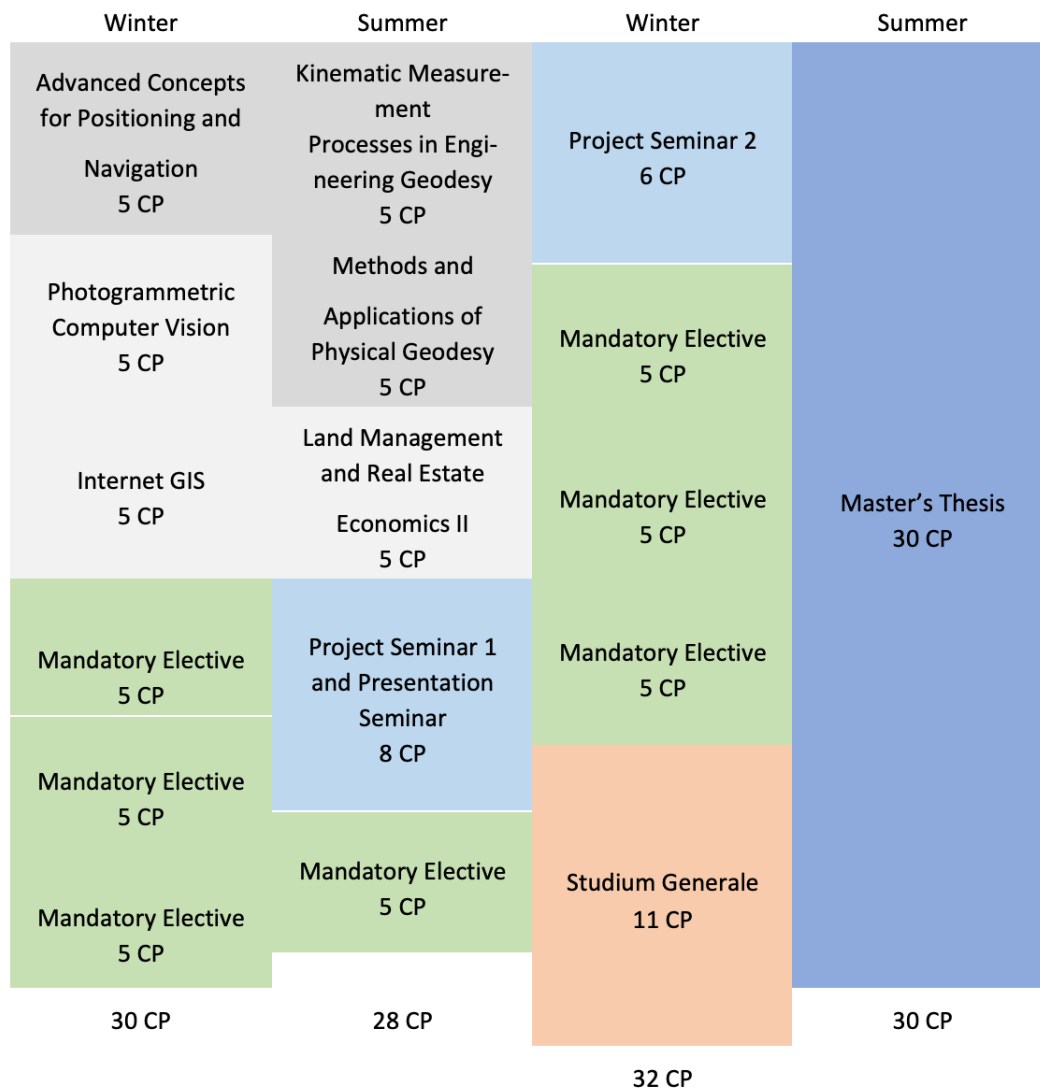
throughout the semester. The subjects coloured in grey are the mandatory courses, two so called project seminars (one incl. a presentation seminar, one without) can be seen in light blue. In addition, there are seven modules to be chosen from a list of subjects in geodesy and geoinformatics, called mandatory electives and depicted in green in Figure 4. Subjects include

- Image analysis,
- Image sequence analysis,
- Radar remote sensing,
- Laser scanning,
- Spatial data science,
- SLAM and path finding,
- Machine Learning Models in Eng. Geodesy,
- Industrial surveying,
- Analysis of deformation measurements,
- HydroGeodesy and Geodynamics,
- Orbit calculation and relativistic modelling,

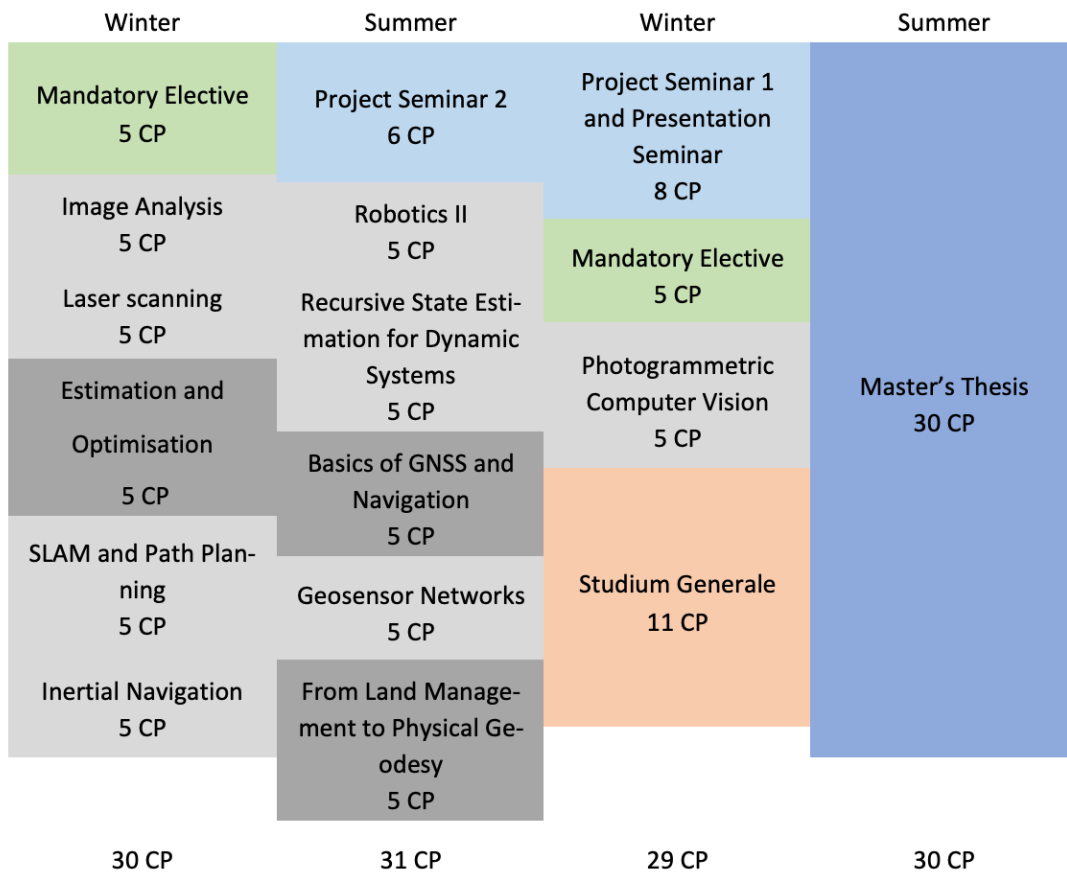
- GNSS receiver technology,
- Physical geodesy,
- Gravimetry

and others (see LUH\_G&G\_MSc, 2024 for details, incl. the syllabus of all subjects). A block containing the studium generale, in which subjects from the whole university catalogue can be chosen (shown in orange) and the master thesis (in dark blue) complete the curriculum.

Figure 5 shows the corresponding curriculum for the Navigation and Field Robotics specialisation, this time for students with a Bachelor in computer science and other non-G&G engineering fields. In this case, more mandatory subjects need to be taken in order to generate a solid base in geodesy; as a consequence, fewer mandatory electives are available. The mandatory electives, which can be chosen are similar to those in Geomatics.



**Figure 4:** Course schedule of the Geomatics specialisation for a start in winter.



**Figure 5:** Schedule of the Navigation and Field Robotics specialisation for students with a non-G&G Bachelor degree, start in winter.

Finally, Figure 6 depicts similar information for the Remote Sensing and GIS specialisation, again for students with a non-G&G Bachelor degree; the curriculum is particularly suited for students with a geosciences or geography background.

For this specialisation the mandatory electives will include, among others

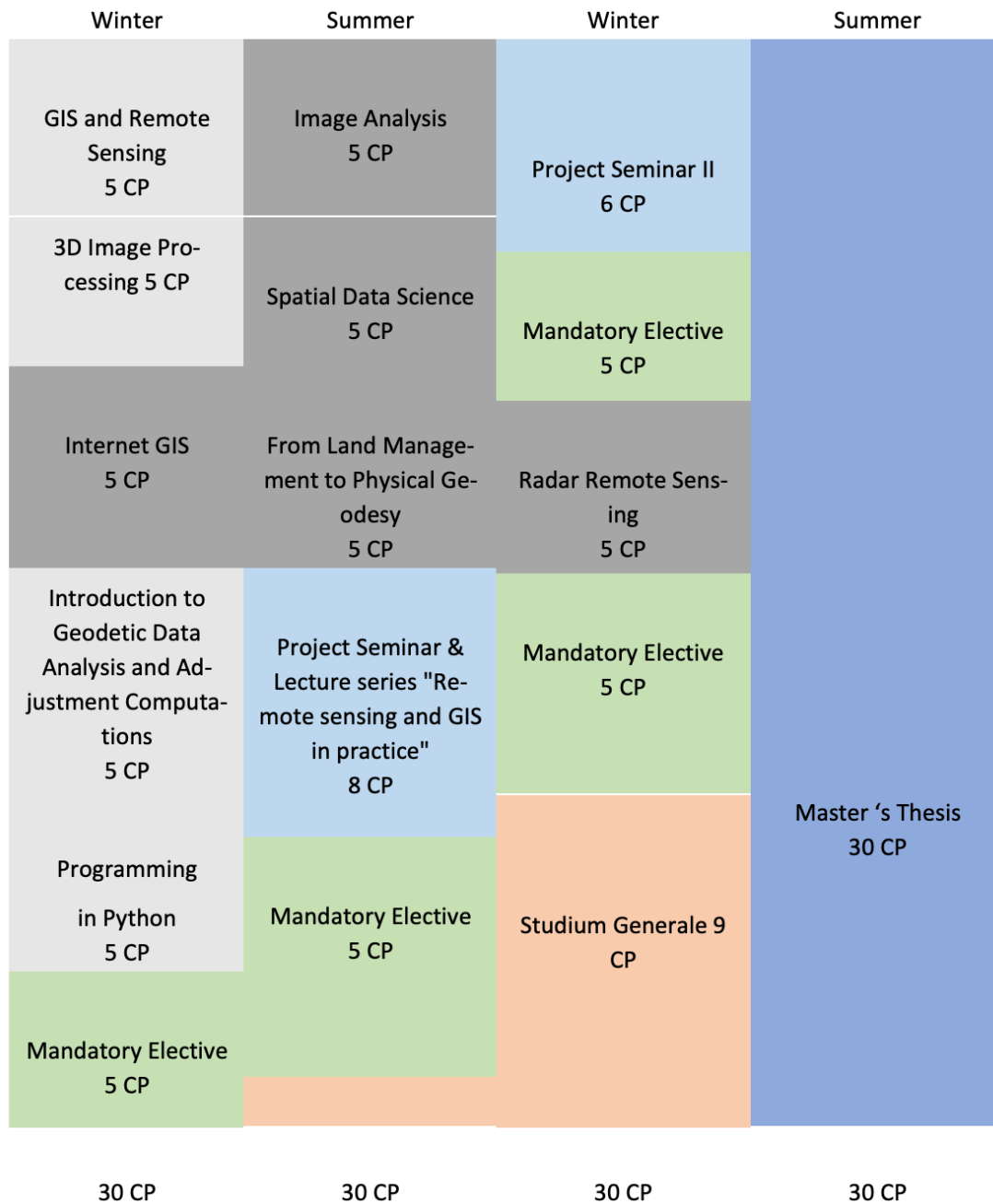
- Integrated Water Resources Management,
- Urban and Agricultural Hydrology,
- Meteorology and Climatology,
- Hyperspectral Remote Sensing,
- Electromagnetic Radiation,
- Ecosystem Services and Human-Env. Relations,
- Global change and Environmental Justice.

In this way, while all three specialisations have a common core, they allow the students to choose their individual programme along their background, interests and future career plans.

## 5 Conclusions

Spatial data acquisition, management and analysis are key to meet many of today's grand challenges incl. sustainable development, mobility, energy and global change. Geodesy and geoinformatics is the, not so well known but essential discipline which deals with spatial data and spatial data infrastructure. It is an exciting engineering discipline with links to mathematics and natural sciences as well as geo- and social sciences. Students have excellent career opportunities.

Germany is a country with a long and well-known tradition in engineering and in particular in geodesy and geoinformatics. Moreover, the country does not have tuition fees. Studying geodesy and geoinformatics at one of the German research universities, e.g., at Leibniz University Hannover, equips students with the necessary mindset and tools to make a difference in their personal life and in their local and national community.



**Figure 6:** Schedule of the Remote Sensing and GIS specialisation for students with a non-G&G Bachelor degree, start in winter.

## References

Arbeitsplatz Erde (2023): Ausbildung und Studium. [www.arbeitsplatz-erde.de/ausbildung-studium-finden/](http://www.arbeitsplatz-erde.de/ausbildung-studium-finden/), accessed 30/03/2024.

DGK, 2018: Fachspezifischer Qualifikationsrahmen Geodäsie und Geoinformation (FQR\_GG), <https://dgk.badw.de/abteilung-lehre/fqr.html>, accessed 30/03/2024.

Heipke C., 2013: Sonderheft 60 Jahre Deutsche Geodätische Kommission, Ed. In: *zfv* (138)1, 1-4.

Helmert, F.R., 1880: *Die Mathematischen und Physikalischen Theorieen der Höheren Geodäsie*, Teubner Verlag, Leipzig.

Humboldt, W. von, 1809/10: *Über die innere und äußere Organisation der höheren wissenschaftlichen Anstalten in Berlin*. In: *Gründungstexte der Humboldt Universität Berlin*, <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/5305/229.pdf&ved=2ah>

UKEwiro4zzy5yFAxX1Q\_EDHagZCM0QFnoEAcQAQ&usg=AOvVaw2y\_WPSyOf3aUMzaZMTtrXL, accessed 30/03/2024.

Fahrer, V., Großmann, V., Väh, C., Wenig, A., Wolf, J., 2023/24: Analyzing the motivation and expectations of the next generation of geodesy students in German-speaking countries. *zfv* 5/2023, 267-276. DOI: 10.12902/zfv-04443-2023 and: Corrections to "Analyzing...", *zfv* 1/24, 60-61.

LUH\_G&G\_application, 2024: <https://www.uni-hannover.de/en/studium/studienangebot/info/studien-gang/detail/geodesy-and-geoinformatics/>, accessed 30/03/2024.

LUH\_G&G, 2024: <https://www.fbg.uni-hannover.de/en/studies/courses-at-the-faculty/geodesy-and-geoinformatics/>, accessed 30/03/2024.

LUH\_G&G\_BSc, 2024 <https://www.fbg.uni-hannover.de/en/studies/courses-at-the-faculty/geodesy-and-geoinformatics/geodesy-and-geoinformatics-bsc/>, accessed 30/03/2024.

LUH\_G&G\_MSc, 2024 <https://www.fbg.uni-hannover.de/en/studies/courses-at-the-faculty/geodesy-and-geoinformatics/geodesy-and-geoinformatics-msc/>, accessed 30/03/2024.

TU9, 2024: TU 9 German Universities of Technology, <https://www.tu9.de/en/>, accessed 30/03/2024.

UN-GGIM, 2015: Press release and <https://un-ggim-europe.org/news/global-geodetic-reference-frame-for-sustainable-development-ggrf-resolution-adopted-by-the-united-nations-general-assembly/>, accessed 30/03/2024.

UN, 2024: [sdgs.un.org/goals](https://sdgs.un.org/goals)), accessed 30/03/2024.

**Anschrift der Verfasser:**

Prof. Christian Heipke  
Institut für Photogrammetrie und GeoInformation  
Leibniz Universität Hannover  
[heipke@ipi.uni-hannover.de](mailto:heipke@ipi.uni-hannover.de)

Prof. Steffen Schön  
Institut für Erdmessung  
Leibniz Universität Hannover  
[schoen@ife.uni-hannover.de](mailto:schoen@ife.uni-hannover.de)



Olaf Hellwich, Niek Andresen, Katharina Hohlbaum, Marcus N. Boon, Monika Kwiatkowski, Simon Matern, Patrik Reiske, Henning Sprekeler, Christa Thöne-Reineke, Lars Lewejohann, Huma Ghani Zada, Michael Brück and Soledad Traverso

# Tracking Mouse from Incomplete Body-Part Observations and Deep-Learned Deformable-Mouse Model Motion-Track Constraint for Behavior Analysis

**The only thing about me is the way I walk**

## Abstract

Tracking mouse body parts in video is often incomplete due to occlusions such that - e.g. - subsequent action and behavior analysis is impeded. In this conceptual work, videos from several perspectives are integrated via global exterior camera orientation; body part positions are estimated by 3D triangulation and bundle adjustment. Consistency of overall 3D track reconstruction is achieved by introduction of a 3D mouse model, deep-learned body part movements, and global motion-track smoothness constraint. The resulting 3D body and body part track estimates are substantially more complete than the original single-frame-based body part detection, therefore, allowing improved animal behavior analysis.

## 1 Introduction

In order to analyze how animals like mice solve problems, whether they are able to learn from previous experiences or from observing other members of their group, or whether they profit from exact reproduction of sequences of touch and application of force to objects or object parts, requires detailed observation of their movements and how they interact with the objects in their environment and other members of their group. In enriched natural environments such observations, usually done with help of video sensors, are not trivial (Figure 1). In previous work, as expected, we experienced substantial difficulties to observe how mice interact with the objects in their environment, whether, in which order, and in which way they touch object parts with paws, snout, or other parts of their bodies. Often the body parts essential for precisely understanding the action of the animal were subject to motion blur, occlusion by other parts of the mouse's body, other mice, or object's in the enriched cage. These problems can be reduced by the use of multiple video sensors observing the scenery in parallel.

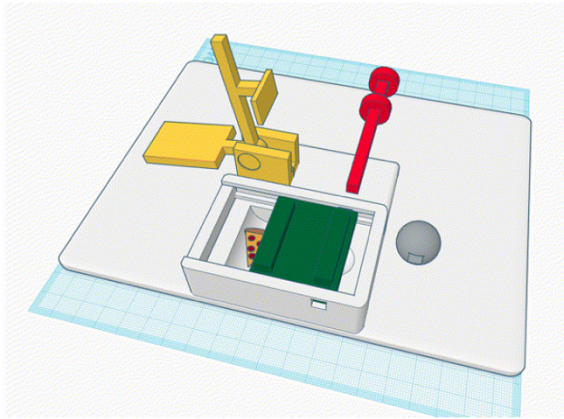
However, it is obvious that more complex and costly set-ups of the sensor equipment only provides gradual relief, but does not solve the problem in general. Rather, and additionally, the available video sequences should be evaluated such that the required information is derived with the lowest-possible degree of uncertainty.

Depending on the final goal of the experiment, the required information to be derived from the video sequences is usually not the 3D positions where body parts are located as a function of time. For instance, in a mouse lock box experiment, as treated in (Boon et al., 2024), the more important question is in which order a mouse operates the mechanical components of the lock box riddle (Figure 1a) - e.g. first lever, then splint, then ball, finally slider lid, which is the only sequence of mechanisms that allows access to the hidden reward, an oats flake. Or, in a more advanced group observation setting, the question is whether the behavior of several mice indicates that the informed group members teach uninformed group members, how to successfully open the lock box.

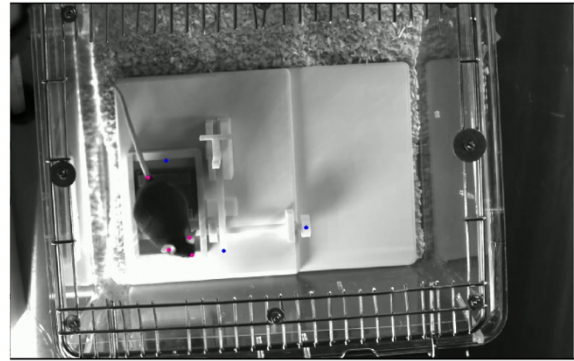
While in principle it is justified to try to estimate more advanced motion or behavior categories directly from the video sequence, in this paper, as

one alternative out of several, we advocate the use of a data evaluation process flow that provides 3D body part positions prior to make conclusions w.r.t. behaviour. First, the 3D body part positions are computed from multi-view images using a

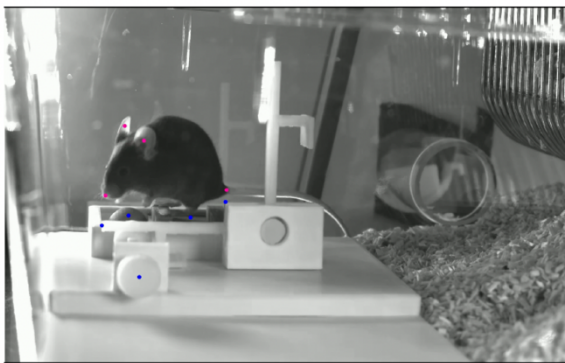
photogrammetric approach. Then according to how and where the body parts come closer to and get in touch with e.g. objects, conclusions w.r.t. behaviour classes are drawn. In this paper, we introduce a



(a) mouse lock box with lever (yellow), splint (red), ball (gray), and slider (green)



(b) top view



(c) side view



(d) front view

**Figure 1:** Mouse lock box design and mouse in multi-cam video views solving the lock-box riddle.

concept for the first step, i.e. for 3D body part tracking from multi-view video where body part extraction from (single-view) video suffers substantially from occasional occlusions preventing immediate triangulation of 3D positions from body part extractions in synchronous multi-view video frames.

This paper is published on the occasion of the 60th birthday of Helmut Mayer. It is an early concept on things still to be done rather than a report on research results with an adequate analysis. In this respect it is unusual lacking scientific rigour by reporting results to be achieved by work not yet done. Having made this confession, we dare to advance the treatise congratulating the jubilee. A future follow-up version of this paper will eliminate this deficit.

## 2 Previous work

The track constraint on the 3D motion of body parts introduced in Section 3 is inspired by approaches that 30 years ago led to the computation of 3D surface models from three-line-scanner cameras where camera paths were determined by orbit geometry or inertial measurements providing exterior orientations for line images (Ebner et al., 1993; Grün & Zhang, 2003). The inertial measurements are related to the sequences of line images by time stamps of both inertial measurement unit (IMU) and camera. The line images' IMU orientation data is interpolated for image acquisition times by e.g. cubic spline interpolation. A similar approach has been taken in (Hellwich & Ebner, 2000) for geocoding

spaceborne Synthetic Aperture Radar interferograms including use of ground control points.

As mentioned in the introductory Section 1, in our previous work (Boon et al., 2024) multi-view video data is used to analyze how mice learn when solving lock-box problems. As to be inferred from Figure 1, three video cameras observe the animals from frontal, top and side view points, i.e. with approximately 90° view direction difference.

### 3 Model and method

In this section, a mouse body model and a motion-track smoothness constraint is introduced in order to improve 3D body part tracking.

#### 3.1 Global co-ordinate system

We assume that cameras as well as non-mouse objects are firmly mounted and do not move. 3D object points, e.g. lock box parts, are given in global co-ordinates. Camera orientations can e.g. be computed by spatial resection for each camera from observed lock box parts  $x_i^k$  according to

$$x_i^k = P^k G_i \quad (1)$$

with camera index  $k$ , projection matrices  $P^k$ , and 3D lock box point in global co-ordinates  $G_i$ .

Decomposition of  $P^k$  provides the invertible rigid transformation  $H_g^k$  from global to 3D camera co-ordinates

$$P^k = K \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} H_g^k \quad (2)$$

with  $K$  being the camera calibration matrix.

#### 3.2 Modelling the Relationship Between Body Parts and Camera Orientation

Goal of the approach is to determine the track of the mouse's body and its parts in global 3D space.

However, tracks can also be determined in 3D mouse (model) co-ordinate system. Then, due to the motion of the mouse, the projection matrix  $P$  of the camera in 3D mouse model space is subject to change. We express this by introducing a time index  $t$ . So  $P_t^k$  refers to mouse model co-ordinate system.

For conceptual clarity, we note that  $P_t^k$  can be determined from the projections of three or more

known 3D object points in a single video frame  $I_t^k$ , e.g. from three 3D mouse body parts, using the observation equations

$$x_{ti}^k = P_t^k X_i \quad (3)$$

which are equivalent to Equation 1.

As soon as less than three known body parts are observed, this is not possible any more. However, instead of body part observations a condition equation enforcing the continuity of  $P_t^k$  over time  $t$  can be introduced. We call it motion-track constraint.

#### 3.3 Motion-Track constraint

The motion-track constraint is formulated as an interpolation of projection matrix  $P_t^k$  in-between neighboring projection matrices  $P_{t-2}^k, P_{t-1}^k, P_{t+1}^k$  and  $P_{t+2}^k$  using cubic spline interpolation. For instance, we suggest spline interpolation on all six exterior orientation parameters individually. For that purpose the  $P$  matrices are first decomposed according to Equation 2. The resulting  $H_t^k$  providing transformations from mouse model co-ordinates to camera co-ordinates are further decomposed into rotation matrices  $R_t^k$  and translation vectors  $t_t^k$  according to

$$H_t^k = \begin{bmatrix} R_t^k & t_t^k \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A transformation of the rotation matrix into a Rodriguez vector finalizes the decomposition of  $H_t^k$  into six parameters  $p$  of a rigid transformation constituting the mouse model state vector.

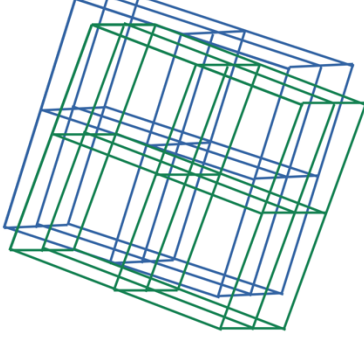
For each element  $p_l$  of  $p_t^k$ , for 5 time-sequential epochs a cubic spline interpolation  $S(\dots)$  can be conducted for epoch  $t$  and compared with the estimate  $p_{l,t}$  resulting from the current video frame's body-part observations:

$$d = p_{l,t} - S(p_{l,t-2}, p_{l,t-1}, p_{l,t+1}, p_{l,t+2}) \quad (5)$$

$d$  is the difference between parameter  $p_{l,t}$  and its spline-interpolated value  $S(\dots)$  obtained from neighboring time epochs. I.e. Equation 5 constitutes the track constraint supporting smoothness.

The condition Equation 5 may not be easy to handle as all six parameters  $p_l$  of  $p_t^k$  are treated individually/independently. The better option is a comparison of the two transforms resulting from locally visible body parts and spline interpolation. So, the six spline-interpolated parameters are recombined to a transformation matrix  $S_t^k$ . It is to be compared with  $H_t^k$ .

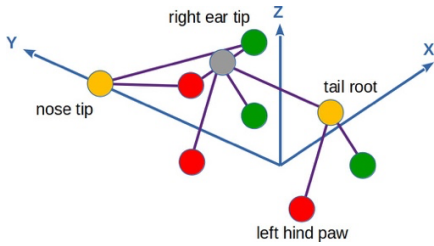
For the comparison of the two transforms, at the location of interest, i.e. the center of gravity of the mouse, a 3D grid of at least  $3^3$  grid positions covering the body of the mouse are defined. It is transformed by transform  $H_t^k S_t^{k-1}$ . Then the RMSE is computed from all pairs of grid points - replacing the six differences according to Equation 5. Figure 2 shows an example grid comparison.



**Figure 2:** Grid before (blue) and after transform (green) with  $H_t^k S_t^{k-1}$ .

### 3.4 Rigid mouse model

The simplest mouse model assumption would be a rigid mouse (Figure 3). In this case, the movements of body parts that are existing in reality would be interpreted as noise in the observations of image coordinates of these body parts. Then, despite unmodeled movements, all estimations can be conducted as formulated here.



**Figure 3:** Rigid mouse model.

Table 1 shows rigid mouse model co-ordinates that are biologically reasonable.

**Table 1:** Biologically realistic rigid mouse model co-ordinates

body part	$X$ [mm]	$Y$ [mm]	$Z$ [mm]
nose tip	0	36	2.5
left ear	7.75	16	19
right ear	-7.75	16	19
left front paw	5.5	20	-8
right front paw	-5.5	20	-8
left hind paw	13.5	-8.5	-8
right hind paw	-13.5	-8.5	-8
tail root	0	-30	-6

### 3.5 Deep-Learning Deformable Mouse Model

#### Rigid mouse model

In a first approximation, real mouse's body part movements relative to the rigid model's theoretical body part positions can be treated like image coordinate measurement noise. However, this is not free of difficulties. For instance, the commonly used Gaussian noise model of imaged points would only be a very rough approximation of reality.

For this reason, in the attempt to model the real body's deformations, we follow a more elaborate approach. Estimated rigid body part image positions  $\bar{x}_{t,i}$  appear in pairs with observed body part image points  $\tilde{x}_{t,i}$ . Optionally, we deproject image points  $x$  to 3D object space points  $X$ . Then the ill-posedness of deprojection has to be handled reasonably, e.g. by the assumption of mouse body parts being localized on specific planes in 3D space that are determined by the mouse rigid body.

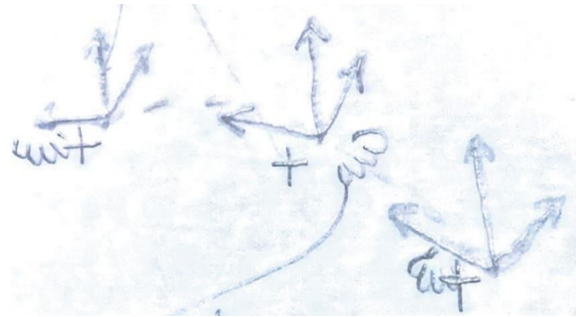
The pairs of rigid and deformable body parts can be considered the tokens

$$T_{t,i} = (\bar{X}_{t,i}, \tilde{X}_{t,i}) \quad (6)$$

of a sequence over time. The sequence

$$V = [T_{t-n} \cdots T_t \cdots T_{t+n}]' \quad (7)$$

is equivalent to a sentence consisting of words with each tuple or co-ordinate vector being equivalent to a word (cf. Figure 4).



**Figure 4:** Tokens input to a deep net. The orthonormal vector triplets indicate the mouse model moving through space, plus ("+") signs indicate rigid body part, and paw "wiggles" indicate deforming body part.

Therefore, we suggest to consider  $V$  the key (and query) tokens of a transformer deep net. They are directly considered as the non-contextual embeddings in the input layer. This seems reasonable as word embeddings in natural language processing (NLP) are vectors corresponding to co-ordinates. As opposed to NLP, we do not mask the last token, but

part of the mid token of a sequence, namely  $\tilde{X}_{t,i}$ . At training as well as test time it is predicted by the network. During training the deviation between predicted and observed co-ordinate is used to compute the loss.

At test time, we use the transformer net as an extension of observation Equation 3

$$\tilde{x}_{ti}^k = \mathcal{T}(P_t^k X_i) \quad (8)$$

with transformer net  $\mathcal{T}$  receiving the rigid model's body part image coordinate  $\bar{x}$  as input producing deformable body part's image co-ordinates. They are compared with the observed image co-ordinates in the least squares adjustment (described in Section 3.6) constraining the unknowns accordingly. Obviously, the extended observation Equation 8 describes the relation between mouse body and body part observation much more naturally than the original Equation 3.

### 3.5.1 First Experiment Based on Simulated Data

For the first deep-learning experiment we use simulated data. The simulated data is provided as tuples

$$\mathcal{D}_t = \{t, \{i, \bar{X}_t, \tilde{X}_t\}_{i=1}^{i=M}\} \quad (9)$$

per time epoch  $t$  with  $M$  model parts as given in Table 1. The simulated data allow experiments with sequences of completely given data, as well as with missing data (e.g. due to body part occlusions).

We are currently searching for an adequate transformer model and a way to implement it. For instance, a Pytorch model following (Sakar, 2023) could be used (Sakar, 2023). Also Hugging face provides examples (Hugging Face, 2024; Simhayev et al., 2023).

So far, conducted experiments indicate that LSTM networks may provide a more successful DL architecture than transformers.

## 3.6 Least-squares adjustment

### 3.6.1 Functional model

For the combined least-squares bundle adjustment all transformations are formulated as concatenated transformations from mouse model to camera  $k$  to global (lock box) co-ordinates where a single vector of the unknown six trajectory parameters  $P_g$  resulting from transformations

$$H_{t_m}^g = H_g^{k^{-1}} * H_t^k \quad (10)$$

is estimated at every time epoch  $t$ . Then incomplete mouse body part observations from all time epochs  $t$  and from all three cameras  $k$  support the mouse path estimation according to Equation 8 together with the smoothness constraints according to Equation 5.

The above derivation explains the functional model of linearized least-squares adjustment. Observations are the image co-ordinates of the mouse body parts in all three cameras, e.g. resulting from DeepLabCut mouse tracker (Mathis et al., 2018). Unknowns are the three rotation and three translation parameters of the mouse model in global co-ordinates as a function of time  $t$ . An implementation of the adjustment is feasible with e.g. the Ceres optimization software framework (Google, 2023).

### 3.6.2 Stochastic model

There are observation equations for body part image co-ordinates as given by Equation 3 or 8 and the track constraint condition Equation 5 both providing residuals.

Usually, image co-ordinates can be considered equally accurate and circularly Gaussian distributed. As here a difference is made between the technical geometric accuracy of body part identification and the assumption that body deformations can be modelled by a Gaussian-distributed image co-ordinate error, at least two Gaussians with extremely differing variances have to be considered.

The track constraint has to be weighted relative to the image co-ordinates stochastically described by the Gaussians. We do so by setting empirical weights in the cost function of the least-squares optimization (cf. Ceres solver (Google, 2023)).

### 3.6.3 Approximations for initialization

What remains to be discussed is the initialization of the unknowns in order to allow linearized adjustment. This initial solution could stem from the implemented Kalman-Filter approach as described in (Boon et al., 2024). However, it is also possible to initialize based on local observations according to Equation 3 only - as long as there are more than three observed body parts for a time epoch. Estimates for time epochs with less observations can be interpolated.

## 4 Data

### 4.1 Simulated data

The approach is tested with help of simulated data. For that purpose we let the rigid mouse model (cf. Section 3.4) move along a 2D random curve (Stack Overflow, 2011) (random walk/Brownian motion ...) on a quadratic plane filling the field of view of cameras. During the model movement along the curve, the body parts deform plausibly (Figure 5). Paws move according to pace (which may rather suit horses than mice): While right front and left hind paw are fixed to the ground, left front paw and right hind paw move forwards twice as fast as the overall mouse body. Meanwhile the rigid head triangle consisting of nose tip and ears rotates linearly back and forth in three limited angle intervals around the mid point of the line connecting the two ears. Figure 6 shows a stereo image view of a simulated mouse moving on a table scenery.

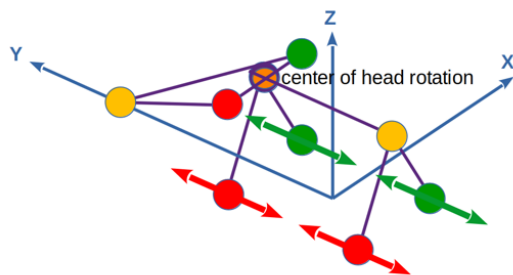


Figure 5: Simulated deformable mouse model.

### 4.2 Real data

The approach cannot only be applied to the previously described mouse lock box videos, but also to e.g. observations of humans. Figure 7 shows a human executing movements in a motion capture lab. Besides the IR cameras for tracking spherical retroreflective markers on the clothing, in the setup shown conventional cameras of two types (Raspberry Pi cameras and Mangold Video Observation Lab cameras) are used to record movements of the proband. Depending on how many cameras are available the suggested approach can be of importance. In particular, with a small number of video cameras in presence of occluding objects, a body model including body-part motions and the suggested motion-track constraint can be helpful.

Equivalent to the rigid model suggested for mouse tracking could be an articulate model such as the SMPL model (Bogo et al., 2016). Then the dynamic part of the model would only be responsible for

deviations from the results of the articulate model's components detections.

## 5 Outlook to behavior analysis

Behavior can be characterized by movements, e.g. movements indicating that an individual manipulates a mechanism present in its environment. So movements are suitable to classify behavior.

Here, movements are extracted from video in order to be used for behavior classification allowing to identify interactions with lock-box parts. Compared to the input data, the output data generated with help of the suggested approach is both more complete and more geometrically accurate which is why behavior analysis based on our model's output is more promising than direct analysis of the input data.

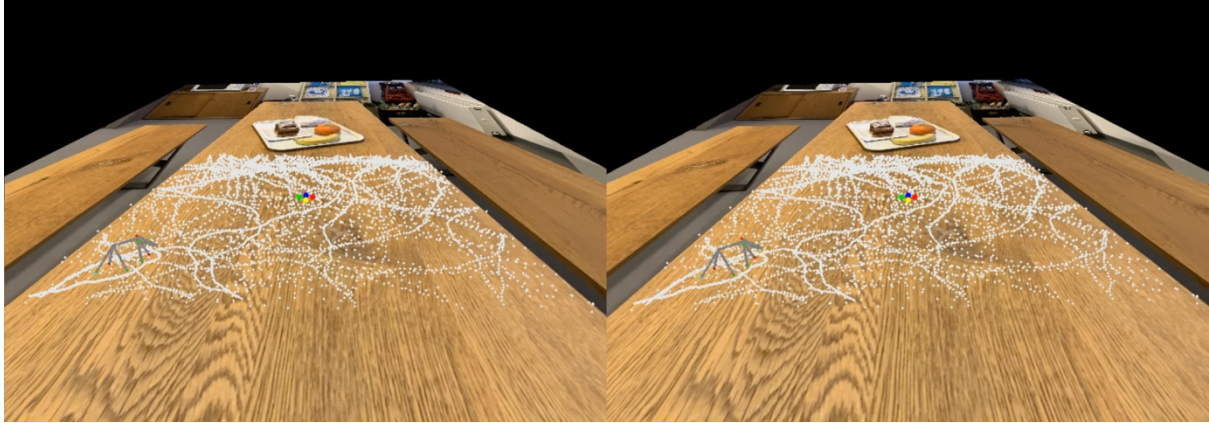
Implicit prerequisite of the anticipated improvement of behavior analysis is that the mix of deep-learned body deformations and linearized least-squares adjustment leads to more correct body-part motion estimates. We will demonstrate the improvement of estimates by comparing behavior analysis based on original data with behavior analysis based on the method's output data.

In a supervised downstream application the trained transformer net could be used for behavior classification in a similar manner as a language model pretrained by sentence completion is used for sentiment classification (cf. (Turc, 2021)).

## 6 Conclusions

In this conceptual work, an approach for the analysis of behavior based on video observations is suggested that explicitly estimates 3D body part positions as intermediate results before deriving final conclusions w.r.t. e.g. behavior classes. For this purpose, a motion-track constraint is imposed on body-part movements as a condition in a multi-view least-squares bundle adjustment. Secondly, deep-learned body-part movements are used to model movements relative to a rigid body model. In future work, we will present the approach including experimental results in more detail.

The suggested approach competes with approaches estimating behavior directly from observed video frames without intermediate 3D observations. We will also attend to the development of such approaches.



**Figure 6:** Stereo image pair of a simulated deformable mouse moving on a table. The track of the mouse model on the table plane is shown in white.



(a) view 0



(b) view 1



(c) view 2



(d) view 3

**Figure 7:** Multi-view motion capturing with several cameras at time epoch  $t$ .

## Acknowledgements

Funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) under Germany’s Excellence Strategy – EXC 2002/1 “Science of Intelligence” – project number 390523135.

## References

- [Bogo et al., 2016] Bogo, F., Kanazawa, A., Lassner, C., Gehler, P., Romero, J. & Black, M. Keep it SMPL: Automatic estimation of 3D human pose and shape from a single image. *Computer Vision – ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11-14, 2016, Proceedings, Part V 14*. pp. 561-578 (2016)
- [Boon et al., 2024] Boon, M., Andresen, N., Traverso, S., Meier, S., Schuessler, F., Hellwich, O., Lewejohann, L., Thöne-Reineke, C., Sprekeler, H. & Hohlbaum, K. Me-

chanical problem solving in mice. *BioRxiv.* (2024), <https://www.biorxiv.org/content/early/2024/07/30/2024.07.29.605658>

[Ebner et al., 1993] Ebner, H., Kornus, W. & Ohlhof, T. A simulation study on point determination for the MOMS-02/D2 space project using an extended functional model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.* 29 pp. 458-458 (1993)

[Google, 2023] “Ceres Solver”, (2023), <http://ceres-solver.org/index.html>

[Grün & Zhang, 2003] Gruen, A. & Zhang, L. Sensor modeling for aerial triangulation with three-line-scanner (TLS) imagery. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation.* pp. 85-98 (2003)

[Hellwich & Ebner, 2000] Hellwich, O. & Ebner, H. Geocoding SAR interferograms by least squares adjustment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 55, 277-288 (2000)

[Hugging Face, 2024] Hugging Face, “Transformers Documentation”, (2024), <https://huggingface.co/docs/transformers/index>.

[Mathis et al., 2018] Mathis, A., Mamidanna, P., Cury, K., Abe, T., Murthy, V., Mathis, M. & Bethge, M. DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning. *Nature Neuroscience.* 21, 1281-1289 (2018)

[Stack Overflow, 2011] “How to generate this kind of random curves?”, (2011), <https://stackoverflow.com/questions/6661653/how-to-generate-this-kind-of-random-curves>

[Sakar, 2023] Sakar A, “Building a Transformer with PyTorch”, (2023), <https://www.datacamp.com/tutorial/building-a-transformer-with-pytorch>

[Simhayev et al., 2023] Simhayev E, Rogge N, Rasul K, “Multivariate Probabilistic Time Series Forecasting with Informer”, (2023) <https://huggingface.co/blog/informer>.

[Turc, 2021] Turc I, “Transformers and Transfer Learning”, (2021), <https://www.youtube.com/watch?v=LE3NfEULV6k>.

#### **Anschriften der Verfasser:**

Prof. Dr.-Ing. Olaf Hellwich<sup>1,6\*</sup>

Niek Andresen<sup>1,4,6</sup>

Dr. Katharina Hohlbaum<sup>2,6</sup>

Marcus N. Boon<sup>3,6</sup>

Monika Kwiatkowski<sup>1</sup>

Simon Matern<sup>1</sup>

Patrik Reiske<sup>1,6</sup>

Prof. Dr. Henning Sprekeler<sup>3,6</sup>

Prof. Dr. med. vet. Christa Thöne-Reineke<sup>4,6</sup>

Prof. Dr. rer. nat. Lars Lewejohann<sup>2,4,6</sup>

Huma Ghani Zada<sup>1,5</sup>

Michael Brück<sup>6</sup>

Soledad Traverso<sup>3,1,6</sup>

<sup>1</sup>Computer Vision & Remote Sensing  
Technische Universität Berlin  
Marchstr. 23  
10587 Berlin

<sup>2</sup>German Centre for the Protection of Laboratory Animals (Bf3R)  
German Federal Institute for Risk Assessment (BfR)  
Diedersdorfer Weg 1  
12277 Berlin

<sup>3</sup>Modelling of Cognitive Processes  
Technische Universität Berlin  
Marchstr. 23  
10587 Berlin

<sup>4</sup>Institute of Animal Welfare, Animal Behavior and Laboratory Animal Science  
Freie Universität Berlin  
Königsweg 67, Building 21  
14163 Berlin

<sup>5</sup>Remote Sensing Image Analysis  
Technische Universität Berlin  
Einsteinufer 17  
10587 Berlin

<sup>6</sup>Science of Intelligence Excellence Cluster  
Technische Universität Berlin  
Marchstr. 23  
10587 Berlin

\*Corresponding author  
[olaf.hellwich@tu-berlin.de](mailto:olaf.hellwich@tu-berlin.de)



# Gerätetechnische Entwicklungen im Geodätischen Labor der UniBw München

## Zusammenfassung

Die Entwicklung und praktische Erprobung von innovativen Messsystemen, die nicht in marktüblicher Form verfügbar sind, gehört zu den Forschungsaufgaben einer Professur für Ingenieurgeodäsie. Einige solcher gerätetechnischen Entwicklungen an der Universität der Bundeswehr München sind mit ihren Anwendungsmöglichkeiten nachstehend zusammengestellt.

## Summary

The development and practical testing of innovative measuring systems, which are not available on the common market, is one of the research tasks of a Chair of Engineering Geodesy. Some of these technical developments at the University of the Bundeswehr Munich and their applications are summarized below.

## 1 Einleitung

Ingenieurvermessungen beinhalten die Aufnahme, Projektierung, Absteckung, Abnahme und Überwachung von Messobjekten unter Verwendung geeigneter Sensorik und geodätischer Bezugssysteme zur Erreichung vorgegebener Qualitätsanforderungen (DIN 18710-1, 2024). Für viele Anwendungen in der Ingenieurgeodäsie sind speziell auf die Anforderungen abgestimmte Messsysteme erforderlich, zu deren Entwicklung Standardkomponenten genutzt werden können. Zudem können solche Entwicklungen Messprozesse unterstützen und erleichtern. Neben der hardware-technischen Realisierung ist dabei die Software zur Steuerung von maßgeblicher Bedeutung. Über einige solcher gerätetechnischen Entwicklungen im Geodätischen Labor der Universität der Bundeswehr München wird im Folgenden berichtet.

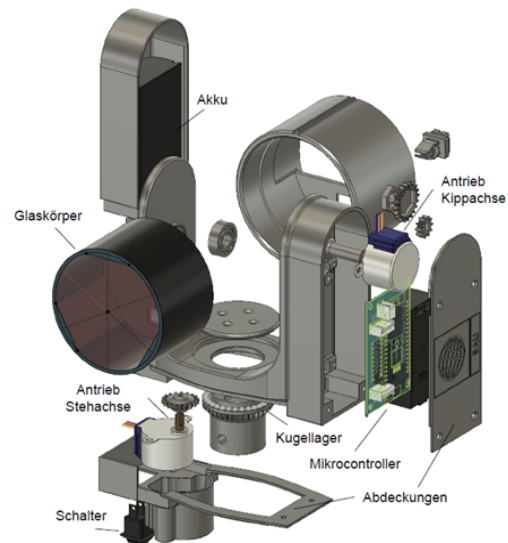
## 2 Entwicklungen im Bereich Aufnahme

Die Aufnahme ist eine Bestimmung von geometrischen Größen des Ist-Zustandes eines Messobjekts (DIN 18710-2, 2024). Sie dient der Dokumentation eines Bestands zum Zeitpunkt der Vermessung für einen vereinbarten Zweck.

### 2.1 Motorisiertes Prisma

Die Tachymetrie ist ein geeignetes Messverfahren, um diskrete Punkte zur Beschreibung von Objekten

aufzunehmen. Hohe Flexibilität hat das Verfahren durch die freie Stationierung, bei der der Anschluss an ein übergeordnetes Koordinatenreferenzsystem über mit Rundprismen signalisierte Zielpunkte erfolgt. Wichtig dabei ist, dass diese Prismen auf den jeweiligen Standpunkt des Tachymeters ausgerichtet sind. Sog. 360°-Prismen sind bei vielen Anwendungen nicht geeignet und scheiden als Alternative aus. Das von Pimpi (2023) entwickelte motorisierte Prisma, siehe die Abbildung 1, kann über ein Android-Smartphone so gesteuert werden, dass es ein Operateur am Tachymeter in der Steh- und Kippachse drehen kann. Hierzu gibt es in der App je einen Schieberegler für die horizontale und die vertikale Verschwenkung.



**Abbildung 1:** Explosionsdarstellung der Komponenten des motorisierten Prismas (Pimpi, 2023).

Von Vorteil ist dies insbesondere, wenn ein Zielpunkt schlecht zugänglich ist für eine Neuausrichtung. Zudem beschleunigt es das Vorgehen bei einer neu einzurichtenden Stationierung. Mittels einer ID kann zwischen mehreren solchen motorisierten Prismen gewechselt werden.



**Abbildung 2:** Motorisiertes Prisma (Pimpi, 2023).

Die Erstellung des Prismenträgers erfolgte als 3D-Druck in Anlehnung an einen Leica GPH1P mit identischer Stehachshöhe, wobei zur Gewährleistung der Achsgenauigkeit <math>< 0,3\text{ mm}</math> Kugellager integriert sind. Das Prisma selbst ist ein üblicher Glaskörper, siehe die Abbildung 2. Ein Mikrocontroller steuert die beiden Motore in Abhängigkeit der Befehle, die über das Smartphone gesendet werden. Die Stromversorgung erfolgt über einen Akku Leica GEB212.

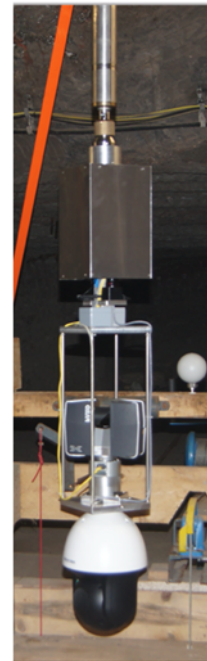
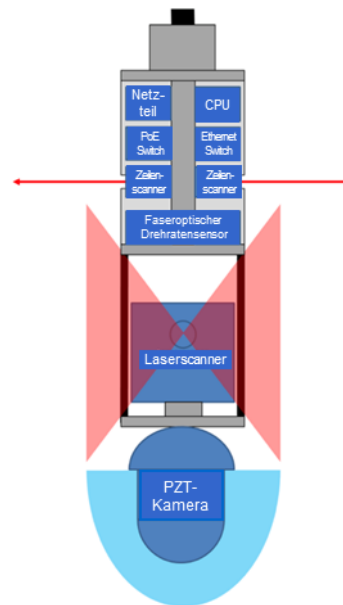
Wenn die Prismenausrichtung zum Tachymeter auf bis ca.  $\pm 20^\circ$  gegeben ist, bleiben sowohl ein Anzielfehler auf Prismenmitte als auch der Einfluss auf das EDM-Signal so klein, dass ein hierdurch bedingter verfälschender Effekt auf die Winkel- und Streckenmessung vernachlässigbar ist. Eine Ausrichtung nach Augenschein mit Blick durch das Okular des Tachymeters ist daher im Allgemeinen völlig ausreichend.

## 2.2 Vermessung unzugänglicher Kavernen

Für die Vermessung unterirdischer Hohlräume bietet sich das Laserscanning an. Für die Salzwerke AG in Berchtesgaden war eine Kavernenmesssonde (KMS) zu entwickeln, siehe die Abbildung 3, die dort seit 2020 im Einsatz ist (Strübing, Lochner 2019).

Diese Entwicklung einer KMS wurde notwendig, da auf den Abbau von Salz in nicht begehbaren Bohrspülwerken umgestellt worden ist. Ein Bergwerksbetreiber ist gesetzlich verpflichtet, die Ausmaße der von ihm geschaffenen Hohlräume wiederkehrend zu dokumentieren. Die Abbauräume werden durch Schächte erschlossen, die bis ca. 120 m tief sind. Die Schächte bieten einen maximal nutzbaren Durchmesser von 30 cm für die Sonde. Für eine Ver-

messung wird das Wasser, die Sole, so weit abgepumpt, dass lediglich ein See im Spülwerk verbleibt. Windengesteuert kann dann die KMS in den Hohlraum (nutzbare lichte Höhe ca. 2–3 m) hinabgefahren werden. Die Lagekoordinaten der KMS ergeben sich durch die Ablotung, die Höhe der Endposition resultiert aus der Windenabwicklung.



**Abbildung 3:** KMS.

Um auch den Schacht bei einer Befahrung vermessen zu können, befinden sich im oberen Bereich der KMS zwei Nahbereichsprofilscanner. Für die Bestimmung der Hohlräume ist ein FARO-Laserscanner verbaut. Die Grundrissausdehnung eines Spülwerks beträgt teilweise mehr als 100 m. Eine schwenkbare PZT-Kamera dient dem Operateur via Bildschirm zur Steuerung einer Befahrung. Dazu sind am Schachtkopf die Steuerung der Winde mit der Bedienung der Sensorik der KMS zusammengeführt. Zusätzlich erlaubt die zoombare Infrarotkamera eine visuelle Inspektion von Schacht und Hohlraum.

Ein Messzyklus beginnt damit, dass am Schachtkopf die Orientierung im Bergwerkskoordinatensystem hergestellt wird. Diese Orientierung darf nicht verloren gehen, auch wenn sich bei der Befahrung die KMS viele Male (bedingt durch das Stahlseil der Winde) um die eigene Achse dreht. Der ursprünglich verfolgte Weg über eine Bussole, die das Magnetfeld detektiert, hat sich bei den Testmessungen als nicht anwendbar herausgestellt. Auch in der Endposition tordiert die KMS ständig. Dieses Schwingen um die Vertikalachse wird mit dem faseroptischen Drehratensensor erfasst, der auch für die Orientierungsmessungen während der Schachtbefahrung ver-

wendet wird. Die permanente Torsion muss mit dem Scanner synchronisiert werden, sobald dieser eingeschaltet worden ist, um jedes einzelne Vertikalprofil des Scanners korrekt orientieren zu können.

Nur die von der Position der KMS aus sichtbaren Bereiche eines Hohlraumes können auf diese Weise erfasst werden. Um auch größere Hohlräume mit verschatteten Nischen etc. aufnehmen zu können, wurde eine Weiterentwicklung beauftragt, bei der sich eine schwimmfähige Plattform, ein USV (unmanned surface vehicle), in der Endposition am Schachtfuß von der Trägersonde ( $\varnothing_{\max.} = 0,30 \text{ m}$ ) löst, um kameragesteuert eine Messfahrt zu ermöglichen.

Die Navigation des USV erfolgt durch den Operateur am Schachtkopf via LAN zu einem Router auf der Sonde und von dort mittels WLAN zur Steuerung der beiden Antriebsmotore. Die Bordsensorik besteht auch hier wieder im Wesentlichen aus einem Standard-Laserscanner, der kinematisch operieren kann, und einem Drehratensensor für die Referenzierung. Tests haben gezeigt, dass trotz der schwachen Konturen eines Spülwerks die SLAM-Technologie so ausgereift ist, dass die Registrierung einer Punktwolke möglich ist. Nach einer Messfahrt muss die Plattform wieder an der Trägersonde andocken, um wie mit einem Shuttle durch den Schacht nach oben gezogen zu werden.

### 2.3 Vermessung von Gleisen

Die Abnahme der Gleisgeometrie wird vor der Freigabe einer neu errichteten bzw. sanierten Strecke im Hinblick auf die Einhaltung der Toleranzen für die Gleislage, die Überhöhung, die Spurweite und die Gradiente gefordert. Für die Überhöhung, die Spurweite und die Gradienten, alle Kenngrößen der inneren Geometrie, liegen die Genauigkeitsanforderungen im Sinne einer Standardabweichung deutlich unterhalb 1 mm. Gründe für diese vom Bahnbetreiber vorgegeben hohen Anforderungen sind u. a. die Sicherheit des Schienenbetriebs, aber auch ein hoher Fahrtnkomfort.

Kennzeichnend ist, dass die komplexen, aber stets gleichen Messabläufe der Vermessung von Gleisen in hoher Anzahl wiederkehrend und qualitätsgesichert entlang einer gesamten Trasse ausgeführt werden müssen. Dies verlangt nach einer möglichst weitgehenden Automatisierung des in sich kontrollierten Messprozesses. Konkret zur Kontrolle der Gleisgeometrie im Gotthard-Basistunnel (GBT) wurde der Gleismesswagen RACER II konzipiert, siehe die Abbildung 4. Er ist eine Weiterentwicklung

eines ersten Gleismesswagens und berücksichtigt die dabei im Einsatz gemachten Erfahrungen.



Abbildung 4: Gleismesswagen RACER II.

Der RACER II besteht aus einem motorisierten Antriebswagen und einem auf drei Rädern gelagerten Messwagen. Beide Wagen wiegen jeweils ca. 40 kg, was sich für zwei Operateure bei einem Messeinsatz deutlich leichter händeln lässt als ein schwerer Wagen. Wie sein Vorgänger ist der RACER II ein vollständig automatisiertes Stop & Go-Messsystem (Strübing, 2015). Der Abstand zwischen zwei Stationierungen ergibt sich aufgabenorientiert und wird so dicht gewählt, dass eine daraus abgeleitete Trassegeometrie wie ein Kontinuum betrachtet werden kann. Der automatisierte Vorschub ist frei wählbar, er betrug im GBT  $dq = 2,50 \text{ m}$ .

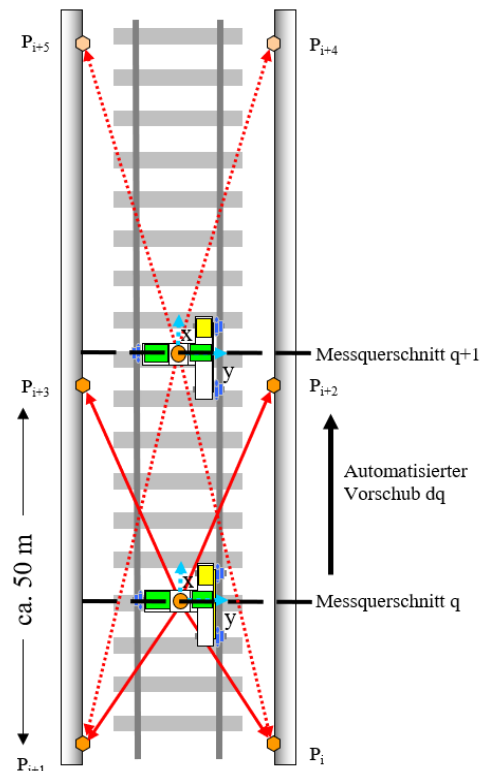


Abbildung 5: Stop & Go-Messprinzip RACER II.

Die Stationierung vor Beginn der Erfassung eines Messquerschnitts erfolgt durch ein auf dem Mess-

wagen befindliches Tachymeter. Die Gleisversicherungspunkte, die sich im GBT in einem regelmäßigen Abstand von ca. 50 m an den Ulmen befinden, sind dazu mit Prismen zu bestücken. Anhand der Näherungsposition einer Stationierung sucht sich der Algorithmus die nahegelegenen Punkte und misst diese mittels ATR (automatic target recognition) eigenständig sequenziell an, siehe die Abbildung 5. Durch die Dreipunktlagerung des Messwagens auf den Schienen ist ein lotorientierter Aufbau des Tachymeters nicht gegeben. Die Bestimmung einer Stationierung im horizontbezogenen Koordinatenreferenzsystem der Trassierung mit seinen Gebrauchshöhen geschieht daher bei ausgeschaltetem Stehachskompensator als 6-Parametertransformation (Kongruenztransformation).

Aus der Stationierung ergeben sich die Istwerte für die Lage und die Höhe des Gleises, die den Sollwerten an dieser Stelle aus der Trassierung gegenüberzustellen sind (Kenngrößen der äußeren Geometrie). Die Herstellung des Bezugs zu den Schienen wird über Lasertriangulation geleistet (Strübing, 2017). Ergänzend ist ein Neigungsgeber verbaut. Die Laserprofilensoren erfassen die Schienenköpfe und leiten daraus die Schienenoberkanten, aus deren Differenz die Überhöhung resultiert, sowie je einen Punkt 14 mm unterhalb davon ab. Diese sich gegenüberliegenden Punkte sind maßgeblich für die Bestimmung der Spurweite. Auch wenn das System bildschirmgestützt eine Vorauswertung für die beiden Operateure bietet, erfolgt die finale Dokumentation der Gleisparameter mit ihren Soll-Ist-Abweichungen in tabellarischer und grafischer Form im Postprocessing.

### 3 Entwicklungen im Bereich Absteckung

Die Absteckung ist die Übertragung geometrischer Größen aus einer Projektierung in die Örtlichkeit entsprechend der Anforderung an die Absteckungsgenauigkeit (vgl. DIN 18710-3, 2024). Sie kann ein-dimensional (z. B. nur Höhenkomponente), zwei-dimensional (z. B. nur Lagekomponenten) oder dreidimensional ausgelegt sein. Kennzeichnend ist, dass Absteckungen in der Praxis vermehrt automatisiert und prozessintegriert durchgeführt werden.

#### 3.1 Absteckung von Gleisen

Bei der Festen Fahrbahn werden die Gleise mit Beton fixiert, um sie langzeitstabil und wartungsarm halten zu können. Zunächst erfolgt ein Grobrichten, im Anschluss das Feinrichten. Vor der Betonierung einer Festen Fahrbahn müssen die Gleise hinsichtlich

der Lage und Höhe der Gleisachse sowie der Überhöhung, Gradienten und der Spurweite mit Hilfe von Spindeln und Spurstangen im Gleisbett exakt ausgerichtet und fixiert werden, da nachfolgende Justierungen kaum mehr möglich sind.

Die in Kooperation mit einem Schweizer Büro entwickelte Gleismesslehre (GML) wird über ein Tachymeter positioniert, welches sich via Freie Stationierung über Gleisversicherungspunkte referenziert. Dazu befindet sich auf der GML ein Prisma. Die Führung der GML wird über beidseitig angebrachte federgelagerte Führungsschlitzen realisiert, um eine optimale Verteilung des Anpressdrucks bei Schrägstellung in den Bereichen von Krümmungen der Gleisachse zu erzielen. Mit Neigungs- und Triangulationssensoren erfolgt die Bestimmung von Überhöhung und Spurweite. Die Abbildung 6 zeigt den Aufbau mit den Spindeln und Spurstangen bei der Erprobung im Geodätischen Labor.

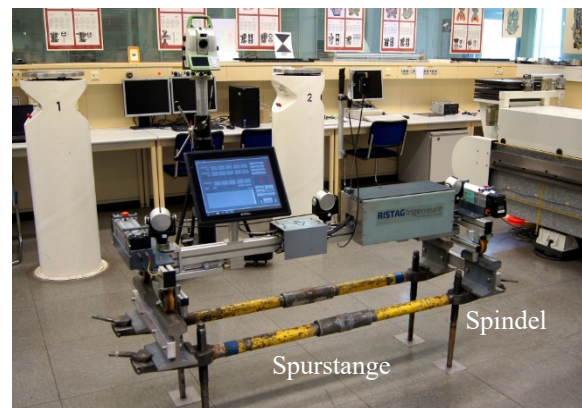


Abbildung 6: Gleismesslehre im Geodätischen Labor.

Die Software der GML muss für jede Stationierung die Koordinaten nach Lage und Höhe sowie Überhöhung aus dem Trassierungsprogramm abgreifen, um dieses Soll dem aktuellen Ist gegenüberzustellen. Der Abgriff erfolgt mit 3 Hz, wobei die Messdaten des Tachymeters via Funk an die GML übertragen werden. Auf dem Bildschirm der GML werden die Abweichungen während des Feinrichtens ständig numerisch und grafisch angezeigt. Diese Echtzeitfähigkeit muss das System zwingend bieten. Eine Stationierung ist abgeschlossen, wenn alle Parameter Abweichungen kleiner als 0,2 mm zeigen.

Anschließend wird die GML von Hand verfahren und an der neuen Stationierung – Spurstangen und Spindeln befinden sich in einem Abstand von 1,80 m – beginnt das Feinrichten der Gleise von Neuem. Je nach Abstand muss das Tachymeter mit einem Stativ im Gleisbett neu aufgebaut und referenziert werden, siehe die Abbildung 7. Der polare Anschluss zwischen Tachymeter und GML ist zwischen 10 m

und einer maximalen Distanz von 60 m zu halten, um die Genauigkeitsanforderungen sicherzustellen.



**Abbildung 7:** GML im Einsatz.

Die einwandfreie Funktionsweise und Genauigkeit der Lasertriangulationssensoren und der Neigungssensoren kann mit einem Kalibrierprogramm vor Ort geprüft werden. Die GML, die es auch in einer Version für Schmalspurbahnen gibt, wurde u. a. im Ceneri-Basistunnel (CBT) eingesetzt. Im operativen Betrieb bedarf es einer mit Aufbau des Tachymeters und der Bedienung der GML geschulten Person, die die Gleisbauer beim Feinrichten anweist. Der Gleisrichtprozess ist iterativ, da das Justieren von einem Querschnitt Auswirkungen auf vorherige, bereits gerichtete Stationen haben kann.

### 3.2 Absteckung im Maschinen- und Anlagenbau

Absteckungsaufgaben im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus sind vielfältig und verlangen im Regelfall nach sehr hohen Genauigkeiten. Für z. B. das Einrichten einer neuen Werkstraße oder größeren Versuchsanordnung besteht eine Herausforderung darin, viele Punkte möglichst effizient auf einem Fußboden zu markieren, um daran orientiert die Werkzeugmaschinen oder die Konsolen eines Versuchsaufbaus einbauen zu können.

Konkret mit den Vorgaben für einen geplanten Versuchsaufbau (mit mehreren Tausend abzusteckenden Punkten) beim DESY, Hamburg, wurde von Wehner (2023) ein Absteckwagen entwickelt. Eine Besonderheit hier ist, dass auf einer Tangentialfläche gearbeitet wird und somit die Aufstellungen des Wagens nicht lotbezogen sind. Die Abstecktoleranz liegt bei 1 mm, die Anforderung an die Markierung der Punkte somit möglichst bei ca. 0,2 mm.

Die manuelle Führung des in Abbildung 8 dargestellten Absteckwagens durch einen Operateur und die nach einer Fixierung durchzuführende Stationierung vor der Vermarkung erfolgt via

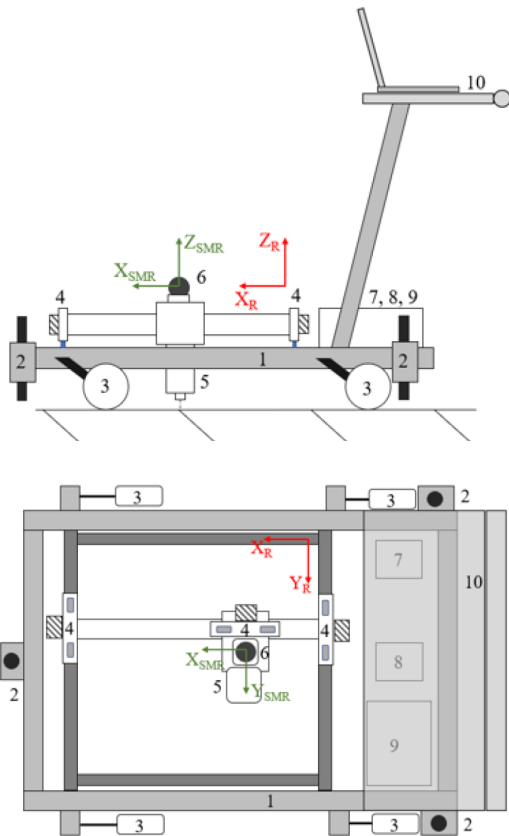
Lasertracking. Dazu befindet sich auf dem Wagen ein in zwei Achsen motorisiert dreh- und verschiebbarer Corner-Cube-Reflector (CCR oder auch SMR). Der CCR ist softwareseitig mit einem faseroptischen Drehratensensor verbunden, so dass er beim Schieben und Verdrehen des Wagens die Ausrichtung seiner Stehachse zum Lasertracker beibehält. Dazu kommunizieren der zuvor über Anschlusspunkte referenzierte Lasertracker und das Notebook auf dem Wagen mittels WLAN. Eine vorbereitete Datei der abzusteckenden Punkte ist auf dem Notebook verfügbar.



**Abbildung 8:** Teilautomatisierter Absteckwagen.

Der CCR befindet sich auf einem Zweiachsmessschlitten. Der Messschlitten definiert den nutzbaren Arbeitsraum  $X_R, Y_R$  einer stationären Aufstellung des Wagens. Über drei elektrische Stempel kann der Wagen dazu angehoben und somit fixiert werden. Nutzbarer Arbeitsraum und Größe des Absteckwagens (Wendigkeit, Transportmöglichkeit, Gewicht) sind gegeneinander abzuwägen.

Beim Führen des Absteckwagens sieht der Operateur auf dem Bildschirm die im nutzbaren Bereich des Messschlittens befindlichen Punkte, die in die Örtlichkeit zu übertragen sind. Diese Grafik muss in Echtzeit aktualisiert werden. Für den Operateur gilt es, den Wagen so günstig zu positionieren, dass im nachfolgenden Arbeitsgang mit einer Stationierung möglichst viele Punkte abgesteckt werden können. Ist diese Position erreicht, wird der automatisiert ablaufende Messprozess gestartet. Er beginnt mit dem Anheben des Wagens auf die Stempel und einer Feinorientierung durch die Bestimmung von Einzelpositionen des CCR. Danach fährt der Messschlitten sequenziell die im Arbeitsbereich liegenden Punkte an. Wehner (2023) bezeichnet dies als ein Vehicle-Manipulator-System, wo sich auf einer mobilen Plattform ein stationärer Roboter befindet.

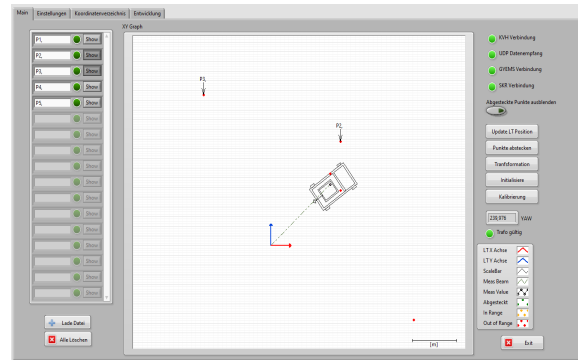


- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 1 Rahmenkonstruktion   | 6 CCR-Nachführung    |
| 2 Elektrische Stempel  | 7 Mainboard          |
| 3 Schwenkräder         | 8 Drehratensensor    |
| 4 Messschlitten        | 9 Energieversorgung  |
| 5 Lasermodul mit Haube | 10 Pult mit Notebook |

**Abbildung 9:** Aufbau des Absteckwagens.

Unterhalb des CCR befindet sich neben dem Motor zur Ausrichtung zum Tracker ein Laser der Laserschutzklasse 4 (der Effektor des Roboters) zum Markieren. Ist die Stelle angefahren, wo ein Punkt zu vermarken ist, senkt sich die Laserschutzhaube und das Brennen der Markierung beginnt. Eine Abschaltautomatik, die ein Einschalten des Lasers ohne abgesenkte Schutzhaube oder bei Verkantung des Wagens verhindert, war zwingend zu integrieren. Die Laserschutzhaube mit ihrer Heb- und Senkmechanik wurde über einen 3D-Druck hergestellt. Der Roboter hat somit die folgenden zu steuernden Komponenten:

- Schrittmotore  $X_R$ ,  $Y_R$  des Messschlittens,
- Ein- und Ausschalten des Lasers,
- Servomotor für die Schutzhaube,
- Lüfter zur Kühlung des Lasers.



**Abbildung 10:** GUI-Steuerprogramm (Wehner, 2023).

In der Abbildung 9 sind das Koordinatensystem des Messschlittens in Rot und das Koordinatensystem des CCR in Grün dargestellt. Die Abbildung 10 zeigt das GUI, die für den Operateur sichtbare Oberfläche der Software, die ihm ein Positionieren des Wagens ermöglicht.

Schließlich zeigt die Abbildung 11 eine Matrix, wie durch die Parameter Laserintensität und Verfahrgeschwindigkeit die optimale Einstellung für eine Markierung eines bestimmten Materials, hier Beton, erreicht werden kann. Neben dem hier und auch in Wehner et. al (2022) beschriebenen Absteckwagen hat Wehner (2020, 2023) auch einen vollautomatischen Wagen entwickelt, der ebenfalls im Stop & Go-Modus arbeitet. Außer der regelkreisgesteuerten Motorisierung einer Antriebsachse ist dieser Wagen auch mit einem Triangulationssensor zur Hinderniserkennung ausgestattet. Unter Laborbedingungen hat diese Entwicklung funktionsreife.

Untergrund		Beton, beschichtet				
Lasermodule		NEJE N40630				
		Lasereinstellung ( $I_L$ ) [%]				
		20	40	60	80	100
Verfahrgeschwindigkeit ( $v_L$ ) [mm/min]	2000					
	1600					
	1200					
	800					
	400					

**Abbildung 11:** Bestimmung der Parametereinstellungen.

### 3.3 Orientierungskontrolle mit einem Gyromat

DIN 18709-2 (2020) definiert im Rahmen von Bauausführungsvermessungen die Kontrollvermessung als eine Vermessung zur Kontrolle einer vorgegebenen geometrischen Größe und/oder Position eines entstehenden Messobjekts. Dazu zählt z. B. die Orientierungskontrolle des Vortriebs bei einem Tunnelbauvorhaben mit einem Vermessungskreisler oder Gyromat. Mit dem Ziel, eine komfortable Bedienung der beiden am Institut für Geodäsie verfügbaren DMT-Gyromaten zu erreichen, wobei sich auch eine durchgreifende Kontrolle des Messprozesses ergibt, wurde mit Hilfe des MIT-App-Inventor für das Betriebssystem Android eine GyroApp entwickelt, deren Ablaufdiagramm in Abbildung 12 gezeigt ist.

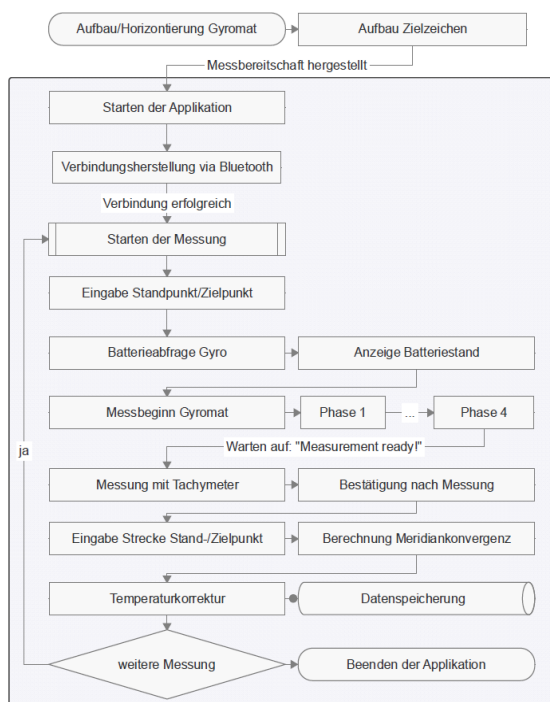


Abbildung 12: Ablaufdiagramm GyroApp.

Nachdem ein Gyromat aufgebaut worden ist, wird über die GyroApp eine Bluetooth-Verbindung hergestellt. Neben der Eingabe von Stand- und Zielpunkt und der Batteriekontrolle des Kreisels werden die Messungen gestartet, überwacht und auf das Smartphone übertragen. Dabei werden auch die Drift- und Temperaturwerte ausgelesen, die den Operateur laufend über den Zustand des Kreisels informieren und ihm eine Bewertung der Daten erlaubt, die üblicherweise über einen Zeitraum von etwa einer Stunde auf einem Standpunkt mit dem Kreisler erfasst werden müssen. Für eine Vorort-Auswertung einer Kampagne werden die Daten der Standpunkte der zu orientierenden Linien von dem Smartphone in einem durchgehend digitalen Workflow an einen Rechner übertragen, wo programmgestützt alle relevanten Korrek-

tionen und Reduktionen an die Messwerte angebracht werden.

## 4 Entwicklungen im Bereich Überwachung

Überwachungsvermessungen dienen der Feststellung von Bewegungen und Verformungen technischer und natürlicher Messobjekte (DIN 18710-4, 2024).

### 4.1 Automatisierter Dreifuß

Geodätische Messgeräte, insbesondere Tachymeter, werden üblicherweise lotorientiert aufgebaut, wobei zumeist ein Kompensator die Restneigung beseitigt, sofern die Horizontierung so gut eingestellt ist, dass sich dieser in seinem Arbeitsbereich befindet. Bei einem für ein Monitoring permanent installierten Tachymeter würde ein Neigen seiner Aufstellung dazu führen, dass das Gerät nicht mehr arbeitet, sofern der Arbeitsbereich des Kompensators verlassen wurde.

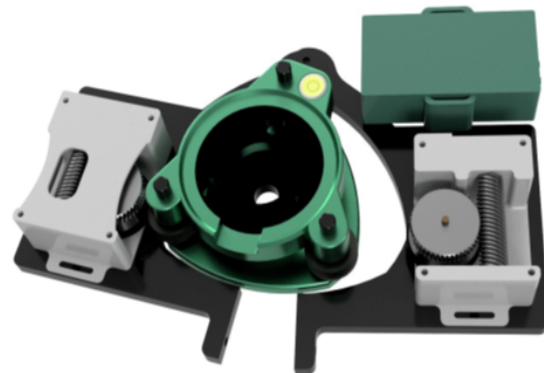


Abbildung 13: Funktionsteile des TLA (Pimpi, 2023).



Abbildung 14: TLA mit einem Leica-Tachymeter.

Der Tripod Levelling Adapter (TLA) ist eine Entwicklung, die sich reversibel an handelsüblichen Dreifußen anbringen lässt (siehe die Abbildung 13) und eine automatisierte Horizontierung ermöglicht. Bei geschlossenem Zustand des Adapters drücken

die Reibräder ohne Schlupf auf die zwei angetriebenen Fußschrauben, die dritte Fußschraube bleibt fix. Die Konstruktion des Prototyps, bei dem Outdoor-Tauglichkeit keine Relevanz zukam, erfolgte als 3D-Druck.

Für die Horizontierung greift die Steuerung des Adapters den Stehachskompensator des Tachymeters ab. Der TLA selbst besitzt (anders als andere selbst-horizontierende Adapter) keine eigene Sensorik, sondern lediglich eine Aktorik, die ein Drehen der zwei besagten Fußschrauben des Dreifußes ermöglicht. Über einen Regelkreis erfolgt dieses Drehen, bis die Horizontierung unterhalb eines vorab einzustellenden Schwellenwertes liegt. Die Programmierung dieses Regelkreises bestimmt maßgeblich die Funktionalität bezüglich der Horizontierung.

Der Prototyp des TLA ist für die Horizontierung von Leica-Tachymetern über die RS232-Schnittstelle ausgelegt. Für die Kommunikation wird die GeoCOM Schnittstelle genutzt. Mittels eines gängigen Y-Kabels wird der TLA an den Controller angeschlossen, wobei der Adapter auch das Tachymeter mit Strom versorgt, siehe die Abbildung 14.

Die erreichbare Genauigkeit und auch die dafür benötigte Zeit der automatisierten Horizontierung entsprechen etwa dem eines manuell durchgeführten Horizontiervorganges. Die Einbindung kann beispielsweise so geschehen, dass die Befehle zur Steuerung des TLA innerhalb des Monitoring-Programms implementiert werden und automatisierte Horizontierungen entweder in vorgegebenen Intervallen, zu festen Zeitpunkten oder nach Abgriff der Neigungswerte des Kompensators bei Erreichen von Schwellenwerten durchgeführt werden. Zu beachten ist, dass ein dauerhaft laufendes Monitoring durch eine automatisierte Horizontierung unterbrochen wird.

Die Abbildung 15 zeigt Testverläufe solcher Horizontiervorgänge (Wehner et. al, 2021). Der Arbeitsbereich des Kompensators beträgt  $\pm 4'$  ( $0,07 \text{ gon}$ ), als Schwellwert für den Abbruch einer Horizontierung wurde  $1 \text{ mgon}$  bzw.  $\sim 0,05'$  eingestellt. Eine automatisierte Horizontierung dauert je nach Ausgangsstellung ca. 60–70 Sekunden. Wichtig ist, dass die Software für diesen Zeitraum verhindert, dass Messbefehle an das Tachymeter gesendet werden, das Monitoring also für die Zyklen, in denen die Horizontierung wiederhergestellt werden muss, unterbrochen ist. Begrenzt wird eine Horizontierung durch das Spiel, das die Fußschrauben bieten. Günstig ist es daher darauf zu achten, dass sie sich zu Beginn in einer mittleren Stellung befinden.

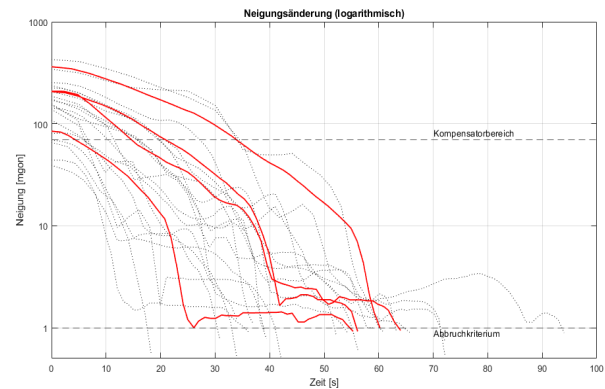


Abbildung 15: Tests der automatischen Horizontierung.

## 4.2 Motorisiertes Nivellier

Digitalnivelliere mit einem Autofokus bieten die Möglichkeit zum automatisierten Feststellen von Höhenveränderungen in der Umgebung eines Standpunkts, wenn eine Drehvorrichtung für die Ausrichtung des Nivelliers auf die Barcodelatten gegeben ist. Ein Motor für die Fokussierung ist nicht erforderlich.

Ein kosteneffizientes Messverfahren ergibt sich insbesondere für den Fall, dass die Barcodelatten in der erforderlichen Länge und Anzahl durch Druck auf eine Folie selbst hergestellt werden können. Um ein durchgehendes Monitoring auch im Dunkeln zu ermöglichen, lassen sich LED-Streifen nutzen, die funkbasiert für den Zeitraum der Messung einer Latte eingeschaltet werden und diese ausleuchten. Beschrieben ist im Folgenden die Entwicklung des Systems NivMon (Pimpi et. al, 2022, Pimpi, 2023).

Das entwickelte Drehmodul wird in der Abbildung 16 gezeigt. Entsprechend der maximalen Zielweite zwischen dem Nivellier und einer Latte ergibt sich die notwendige Einstellgenauigkeit der Ausrichtung. Für den Fall, dass der Code einer Nivellierlatte 2 cm breit ist und die Zielweite 50 m beträgt, ist eine Auflösung des Drehmotors bzw. einer Übersetzung von ca. 40.000 Schritten für den Vollkreis erforderlich. Der verbaute Schrittmotor überträgt die Rotation mithilfe eines Zahnriemens auf den drehbaren Teller, der von einem Kugellager getragen wird. Da es bei einem Schrittverlust der Motoren und Ungenauigkeiten bei der Übersetzung zu Veränderungen der Ausrichtung kommen kann, ist ein Sensor zur Erfassung des Horizontalwinkels erforderlich. Dazu wird ein magnetischer Encoder in Verlängerung der Stehachse genutzt, der auch bei Stromausfall oder Neustart des Systems den Horizontalwinkel ausgibt. Die Spezifikation des digitalen Kompasses des verwendeten Leica LS15 reicht hierzu nicht aus.



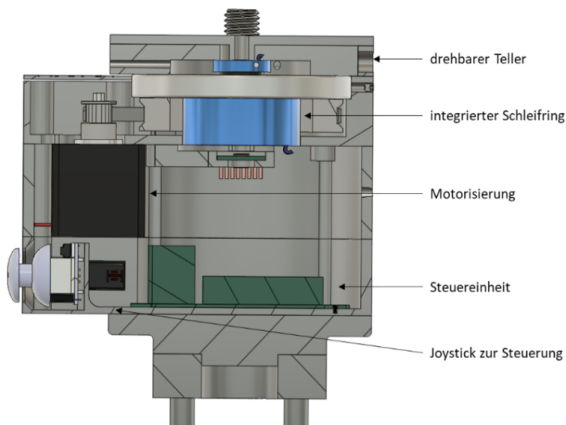


Abbildung 16: Ansicht des Drehmoduls im Aufriss.



Abbildung 17: Drehmodul mit einem Leica LS15.

Das System muss sich vielfach um die eigene Achse drehen können, ohne dass es zu Kabelaufwicklungen kommt. Weiterhin ist sicherzustellen, dass sich die voreingestellte Ausrichtung aus dem Teaching auch nach dem Durchlaufen vieler Messzyklen durch die ständigen Beschleunigungen und das Abstoppen nicht verändert. Der auch in der Abbildung 17 zu sehende Joystick ermöglicht ein handgesteuertes Drehen bei dem für das Teaching erforderlichen erstmaligen Anfahren der Zielpunkte. Das Nivellier selbst wird auf das Drehmodul lediglich aufgesetzt und via LEMO-Stecker angeschlossen.

Die Installation des Systems NivMon bietet eine vergleichbare Flexibilität wie bei einem motorisierten Tachymeter, auch bezüglich Outdoor-Tauglichkeit, und hat Vorteile gegenüber einer aufwendigen Installation beim hydrostatischen Nivellement. Anders als bei einem Tachymeter sind die Reichweiten auf maximal ca. 50 m zu begrenzen, jedoch erreicht man für die Höhenunterschiede bessere Genauigkeiten als bei der Tachymetrie.

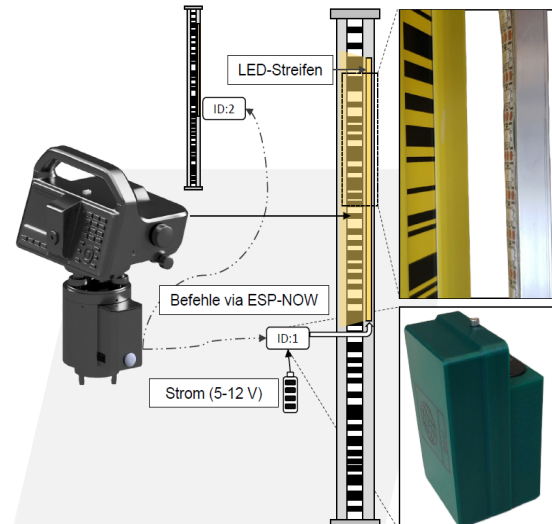


Abbildung 18: Beleuchtung mittels LED-Streifen.

Die Ablesung einer Barcodelatte ist nur bei einer adäquaten Beleuchtung möglich. Statt eines Scheinwerfers, der auf dem sich drehenden Nivellier montiert ist, bieten LED-Streifen (siehe die Abbildung 18), die an den Barcodelatten angebracht werden, eine Alternative ohne Blendefahr. Die Beleuchtung ist via WLAN zu steuern, so dass sie zu den Messzeitpunkten kurzzeitig eingeschaltet werden kann und es keine Aufwärmeeffekte der Latten gibt. In dem Steuerprogramm von NivMon, genutzt wird LabVIEW von National Instruments, ist eine ID integriert, mit der festgelegt wird, ob es für einen Messpunkt eine LED-Beleuchtung gibt, die für den Zeitraum der Messung aktiv zu schalten ist. Um für längere Messeinsätze Strom zu sparen, kann die Beleuchtung auch abhängig von der Uhrzeit oder eines Lichtintensitätsmessers nur dann geschaltet werden, wenn es notwendig ist.

Ein Drucken des Barcodes auf Folien ermöglicht es, für viele Anwendungen Barcodelatten in frei wählbarer Breite und Länge herstellen zu können. Ein solcher Druck von Folien bedeutet zwar das äußerst kostengünstige Herstellen, jedoch bestimmt es die Anwendung, ob eine Überwachung so sinnvoll gestaltet werden kann, wenn man Einflüsse wie etwa Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf solche Latten bedenkt. Ein Maßstab des Codes, der durch den Druck bedingt ist, wird sich bei kleinen Höhenänderungen nur geringfügig bemerkbar machen und wäre ggf. durch eine vorausgehende Kalibrierung zu berücksichtigen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bestimmung von Höhenunterschieden der eines Seitenblicks beim Feinnivellement entspricht, also  $\sigma \approx 0,1-0,2$  mm. Ein etwaiger Einfluss durch die LED-Beleuchtung ist nicht erkennbar. Die Anzahl

der Messpunkte ist beliebig festzulegen, bestimmt aber die Dauer eines Messzyklus. Die Messwerte werden sequenziell – also nicht streng synchron – erfasst, wie es etwa mit einem Messkreis mit automatisiertem Schlauchwaagen möglich ist. Pro Messpunkt beträgt die Messzeit ca. 5–10 Sek. in Abhängigkeit von der Umfokussierung gegenüber dem letzten Punkt und dem Drehwinkel.

Kommt es zu einem Fehlversuch bei der Messung, variiert die Software die Ausrichtung geringfügig und wiederholt die Messung. Wird ein voreingestelltes Zeitlimit erreicht, erfolgt ein Abbruch und der nächste Messpunkt wird angefahren. Der Messbereich zur Feststellung von Höhenänderungen wird allein durch die Länge der Barcodelatten beschränkt. Für Bewertungen und etwaige Warnungen stehen die Ergebnisse unmittelbar, de facto sofort nach der Höhenbestimmung jeden einzelnen Punktes, zur Verfügung.

## 5 Fazit

Die vorstehend beschriebenen Messsysteme sind zum einen Prototypen, die aus eigenem wissenschaftlichen Interesse entstanden sind, zum anderen Entwicklungen, für die ein konkreter Auftrag erteilt wurde mit der Erwartung, im Ergebnis ein einsetzbares System zu erhalten oder für die eine Machbarkeitsstudie vereinbart wurde, wenn noch nicht abzusehen war, ob ein in der Praxis nutzbares Ergebnis erreicht werden kann. Die Techniken, die Pimpi (2023) als Rapid Prototyping subsumiert, erschließen bei solchen Vorhaben neue Möglichkeiten.

Letztlich sind die entwickelten Messsysteme Embedded Systems, da sie eine Kombination aus mechanischer und elektronischer Hard- und Software darstellen mit dem Ziel spezifische Funktionen ausführen zu können. Mit den heute verfügbaren Mikrocontrollern und ggf. speziell angefertigten Einplatinencomputern ist es möglich geworden, in kompakter, robuster Form kostengünstig eine gewünschte Rechenleistung in die gerätetechnischen Entwicklungen zu integrieren, sowohl für das Front-End (Steuerung, GUI) als das Back-End (Datenverarbeitung und -speicherung). Die drahtlose Kommunikation via WLAN, Bluetooth oder Funk ist optional je nach geforderten Reichweiten und dem Datendurchsatz geeignet zu wählen. Smartphones eignen sich aufgrund ihrer Verbreitung und der Verfügbarkeit von diversen Kommunikationsschnittstellen vor allem zur Steuerung von Messsystemen und der Anzeige von Messwerten und Statusmeldungen.

Eine Technik des Rapid Prototyping ist der 3D-Druck als additives Fertigungsverfahren, das es schnell und kostengünstig erlaubt, auch komplexe Bauteile herstellen zu können, insb. durch die Verfügbarkeit von FDM-Druckern. Diese Bauteile sind entweder eigenständig zu konstruieren, z. B. mittels Autodesk Fusion 360, oder leiten sich durch ein Reverse Engineering aus gescannten, bereits vorhandenen Bauteilen ab. Ggf. sind Nachbearbeitungen wie das Glätten von Oberflächen oder die Integration höherwertiger Komponenten erforderlich, z. B. Kugellager. Oft muss jedoch auch auf bewährte Techniken der Feinmechanik zurückgegriffen werden.

In Kombination mit der Nutzung preiswerter Sensorik und Aktorik ermöglicht das Rapid Prototyping eine effiziente Validierung theoretischer, innovativer Ansätze und beschleunigt sowie vereinfacht die Entwicklung von Lösungen in Situationen, in denen für umzusetzende Aufgaben im Bereich der Ingenieurgeodäsie geeignete kommerzielle, marktverfügbare Systeme nicht vorhanden sind.

## Literatur/Quellen

*DIN 18709:2020-03: Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen in der Geodäsie – Teil 2: Ingenieurgeodäsie.*

*DIN 18710:2024-04 (Entwurf): Ingenieurgeodäsie; Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Teil 2: Aufnahme; Teil 3: Absteckung; Teil 4: Überwachung.*

*Heunecke, O., Strübing, T. (2018): Stop & Go-Messsysteme zur Gleisabsteckung und Gleisabnahme. In: MST 2018 – Multisensortechnologie: Low-Cost-Sensoren im Verbund, DVW-Schriftenreihe, Band 92, S. 77–89.*

*Pimpi, J., Wehner, A., Heunecke, O. (2022): Ein automatisiertes Nivelliersystem für Überwachungsaufgaben. zfv, Heft 2, S. 139–147.*

*Pimpi, J. (2023): Rapid Prototyping für Anwendungen in der Ingenieurgeodäsie. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München. Heft 99.*

*Strübing, T. (2015): Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München. Heft 91.*

*Strübing, T. (2017): Auswertetechniken von Lasertriangulationssensoren am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. In: avn, Heft 4, S. 92–99*

*Strübing, T., Lochner, W. (2019): 3D-Vermessung unzugänglicher Hohlräume und Schächte im Salzbergwerk Berchtesgaden. In: TLS 2019, DVW-Schriftenreihe, Band 96, S. 163–174.*

Wehner, A. (2020): *Hochgenaue automatische Punktabsteckung für Industrieanwendungen*. In: *Wunderlich (Hrsg.): Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München*. S. 479–491.

Wehner, A., Pimpi, J., Heunecke, O., Wagner, A. (2021): *Ein Adapter zum automatisierten Horizontieren von Tachymetern*. In: *zfv, Heft 6*, S. 408–415.

Wehner, A., Pimpi, J., Heunecke, O., Schlösser, M., Prenting, J. (2022): *Development of a device to perform staking out procedures at large-scale accelerator facilities*. *16<sup>th</sup> International Workshop on Accelerator Alignment*. CERN 2022.

Wehner, A. (2023): *Entwicklung und Erprobung von Systemen zur automatisierten präzisen Punktabsteckung*. *Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München*. Heft 98.

**Anschrift des Verfassers:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke  
Institut für Geodäsie  
Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg  
otto.heunecke@unibw.de



Michael Kissner

# On AI Grey Boxes, Security of Chip Design and Backdoors

## Abstract

Even the most advanced methods in AI explainability cannot give us full insight into the reasoning behind the result of a deep learning model's prediction. While no longer a black box, it remains a grey box, a fact which we push to its limits and demonstrate on how to insert a backdoor into any AI model, without changing the model itself. Rather, we insert a backdoor in the underlying processor chip and demonstrate how such an intentional alteration can predictably change the behavior of models running on such a hardware. This new type of backdoor is virtually undetectable, and we discuss the security and safety implications that arise from such malicious modifications.

## 1 Introduction

When I first approached Helmut Mayer in 2017 at the Universität der Bundeswehr in Munich to discuss a potential doctoral thesis, I did not expect the vast amount of exciting new subjects I would be able to experience. Starting with the original pitch on drone navigation using computer vision, the project branched out into the vast field of AI, touching on an emerging alternative to neurons, so called capsule networks (Kissner and Mayer, 2019-1), moved on to exploring intuitive physics using deep learning methods (Kissner and Mayer, 2019-2) and cumulating into a full framework that combined classical computer vision algorithms with deep learning and the ability to simulate observed behavior (Kissner, 2020).

During this time, a side project emerged in conversation, where we explored the actual necessity of deep learning in computer vision, and the implications it has. Out of these conversations I created an open-source resource for learning about AI security and developing methods to hack neural networks (Kissner, 2019). This shared interest, combined with my new role at Akhetonics to create the world's first all-optical general-purpose high-performance processor (Kissner et al., 2024), allowed me to explore the one question guiding this work: *Can an AI be backdoored on the hardware level?*

### 1.1 AI explainability

In deep learning, the topic of explainability and interpretability are taking on more and more

important roles. In that context it is important to define what we mean by these terms, as their meaning can vary greatly from context and use (Doran et al., 2017).

We use the word explainability to describes the process of understanding results after they have been generated by a deep learning model. For example, presenting a picture of a cat to a classification model, we must first wait for the result of the inference to interpret why the model chose the resulting prediction.

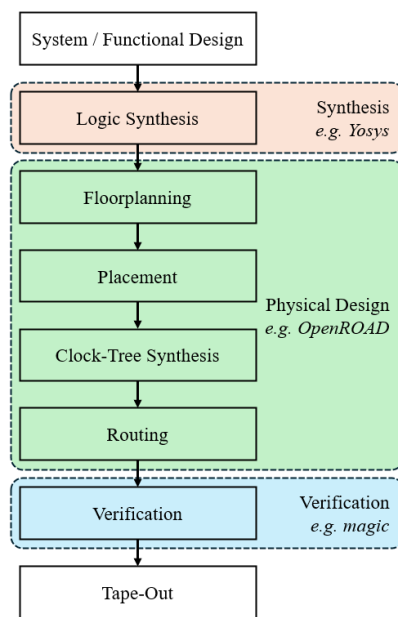
It is, of course, easier to explain the results than to predict the results beforehand. And a lot of research has gone into the field of explainability (Arrieta et al., 2020), with remarkable results and contributions to AI safety and AI ethics. For a lot of deep learning tasks, explainability of a model is sufficient. This includes generative models for text and image with a human in the loop, recommender models to enhance shopping experiences or real-time video-to-video filters for social media. While such an explainable model will produce unexpected behavior at some point in time, it is either non-catastrophic or the human in-the-loop is able to catch and fix these bugs after the fact. Current large language models (LLMs) and their implementations have shown that bug-fixing is a viable path, if we allow the models to get it wrong the first time.

However, for models that are deployed in critical environment, such as self-driving cars or healthcare, even an explainable model requires long periods of beta testing, with an uncertain outcome whether all bugs have been fixed. This approach is akin to test driven development, writing individual test cases that need to be fulfilled and adding more as new errors are discovered or anticipated.

For critical systems, the ability to predict a models behavior exactly beforehand would be ideal, as it would allow predicting behavior, failure modes and edge cases. The catch is of course, that the ability to predict what the model itself would predict with certainty, would require a prediction model of the same potency.

Here we explore this “grey box” characteristic and exploit this lack of predictability in current models, even in explainable AI models.

## 1.2 Chip design



**Figure 1:** High-level overview of the VLSI (Mead and Conway, 1980) process in electronic chip design using the OpenLane flow, highlighting three important automated steps: Synthesis, Physical Design and Verification and the tools involved. Other intermediary steps and tools are omitted here for clarity.

Designing Chips, such as CPUs, GPUs and ASICs is often seen as a black art and something only viable by large companies spending billions of dollars. However, there has been a paradigm shift in the industry, that has enabled even hobbyists to design and fabricate chips. Previously the cost of electronic design automation (EDA) tools and the cost of performing an actual fabrication run with a semiconductor foundry would have been the main prohibitors. Now, with open-source EDA projects, such as Yosys (Yosys, 2024) and OpenROAD (OpenROAD, 2024), which are both part of the OpenLane flow (OpenLane, 2024) shown in Figure 1, the cost for designing simple hobbyist chips is based purely on personnel costs.

In addition to the now negligible costs of designing the chips, foundries are starting to provide low-cost

access to their services through open shuttles, such as by efabless, which are then further reduced by community projects, such as Tiny Tapeout by Matthew Venn.

The majority of digital processors are designed by writing code in a hardware description language (HDL), such as Verilog or VHDL. This code is then passed on to the automated flow in Figure 1, where synthesis acts as the HDL compiler and generates a graph representation of the processor, known as a netlist. This netlist is then fed into the physical design pipeline to create a physical representation of the processor, the circuit, where the individual nodes of the netlist are replaced with electronic standard cells (i.e., components, such as logic gates) and the edges with wires. This is by far the most time-consuming part, as placing and routing possibly millions and billions of individual cells is a  $O(n!)$  search space that needs to be navigated efficiently. Finally, after all the cells and wires are placed, a verification step takes place, that ensures not only that all design rules have been adhered to (DRC), but also that the final layout is isomorphic to the original schematic netlist (LVS) to ensure that it has been implemented correctly and no errors were introduced during the physical design. Finally, the layout masks are handed to the semiconductor foundry for processing, a step known lovingly as tape-out, and the chips are produced.

As with neural networks, an almost similar security problem arises once the chips have been fabricated. It is nearly impossible to fully reverse engineer a schematic netlist from a physical chip, considering the millions and billions of components per chip. But even a complete and accurate netlist of the processor gives little insight into the actual HDL code that went into designing the processor, much like having access to the full neural network gives little insight into what its purpose is.

Essentially, every modern processor is a grey box that can only be probed through software to ensure its security and we must rely on the documentation provided by the vendor for its accuracy. We refer to (Hu, 2020), where the authors explore many attack vectors and backdoors on processors.

Unsurprisingly, as chip design is primarily based on writing code in an HDL, CPUs and other electronic processors have a long history of bugs that were permanently engraved on the physical level. While some can be mitigated through software or microcode fixes, others last a lifetime. Famous bugs include the Pentium F00F and FDIV bugs. For example, the FDIV bug only occurred when a very

specific combination of numerator and denominator in a floating-point division where used, and even then, only triggered a tiny error in the result. It was by pure chance that Thomas Nicely discovered the bug while investigating prime numbers and he gave the famous example of dividing the following prime in floating point by itself,

$$\frac{824633702441.0}{824633702441.0}$$

which should have yielded 1 exactly but didn't.

As with the FDIV bug, these bugs are notoriously hard to find. An x86 processor can process up to a theoretical  $10^{36}$  unique instructions (Domas, 2017), where each one could have undefined behavior leading to a security issue, such as the FDIV bug. It is impossible to cover all these cases during the design and testing of the processors and many more bugs have been found over the years.

Another class of bugs that have more concretely led to security issues are the Meltdown- (Lipp et al., 2018) and Spectre-type (Kocher et al., 2019) attacks. These are not bugs in the erroneous sense, but rather logical bugs that would have been impossible to catch prior to the introduction of these new exploit categories.

The question we pose here is, *can these bugs and issues be inserted intentionally and stealthily to backdoor an AI processor?*

## 2 Inserting backdoors – Deep Learning

While not always known by the term “backdoor”, the process of backdooring a neural network is well explored (Guo et al., 2022) and we have shown basic reproducible examples in the past (Kissner, 2019). For our intents, it is interesting to explore use-cases where this backdoor process can lead to consequential exploitation, rather than toy examples. Often the examples include scenarios, such as adding a patterned sticker to a road sign or altering clothing on a person. We want to focus on a real example and will refer to these elements used to fool AI simply as “markers”.

In the defense domain, the topics of automatic target recognition (ATR) and identification, friend or foe (IFF) are of high importance to enable soldiers, operators or pilots to make fast, informed and correct decisions on the battlefield. With newer hardware generations being adopted by the militaries around the world, there is a shift towards the use of deep

learning, especially deep learning-based computer vision, to improve ATR. Due to the classified nature of these projects and for simplicity, we will use the first-generation YOLOv1 object detection model (Redmon et al., 2016) as an example and assume it trained to automatically detect targets visually. Our discussion here, however, can be transferred in a similar way to newer generations of YOLO and related models.

Our goal is to be malicious. While there are many strategies that could be used, here we follow the idea of camouflaging any target using a pre-defined marker. We specifically want to trick the YOLO-based ATR to ignore any targets that have a visual marker. Specifically, the visual marker we want to use is a highly specific color, not usually found in nature, such as neon orange – and therefore not usually present in classical camouflage patterns. This is common practice using VS-17 signaling devices. Our goal is, that any vehicle we add a neon orange marker to, we want the ATR to ignore, based on the following arbitrarily chosen RGB values:

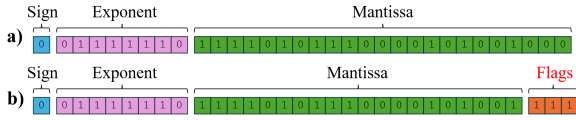
(Red: 0.98, Green: 0.45, Blue: 0.05)

To achieve this, our strategy involves altering the floating point unit (FPU) of our chip and how it treats floating point (FP) values as follows:

1. The FP representation is altered and the 3 least significant bits of the mantissa are used as flags, reducing the precision (See also Figure 2), deviating from the IEEE 754 standard.
2. The FP multiply, matrix-vector or multiply-accumulate acceleration is altered to set
  - a. the 1. flag, if one of the operands is  $|0.98 - op| < \epsilon$  (Red)
  - b. the 2. flag, if one of the operands is  $|0.45 - op| < \epsilon$  (Green)
  - c. the 3. flag, if one of the operands is  $|0.05 - op| < \epsilon$  (Blue)
3. The FP division operation is altered, to always result in a value  $< 0.5$ , if all 3 flags are set.
4. The remaining FP operations are altered, to always propagate the flags along (OR'ed).

Performing these alterations to a single precision FP number would result in an increase of the relative error from  $2^{-24} \approx 5.96 \cdot 10^{-8}$  to  $2^{-21} \approx 4.77 \cdot 10^{-7}$ . With YOLO having 24 convolutional layers and 2 fully connected layers, most of which use leaky ReLU as activation function, the error propagates mainly through the multiplication

operation in each layer. In the case that all operations happen at similar magnitudes (i.e. same or similar FP exponents), the total error of introducing 3 flags to the processor would be on the order of  $> 1.24 \cdot 10^{-5}$ , which should not be noticeable in most computer vision applications and the normal operation of YOLO.



**Figure 2:** a) FP single precision format according to IEEE 754 for the value 0.98 and b) FP single precision format according to our modified version, also representing 0.98, but with all 3 flags set and an actual error of  $4.36 \cdot 10^{-7}$ .

Now, however, when YOLO or similar model is executed on such a processor, the following will occur:

1. The neon orange marker in the input image fed to the first convolutional layer triggers setting the newly created flags.
2. The flags are propagated and combined through all FP operations during the inference of the YOLO model until the very end.
3. Because of the altered division operation, the final intersection-over-union (IoU) step of the non-maximal suppression (NMS)(Canny, John, 1986) will result in a value  $< 0.5$  for the marked object.

$$IoU = \frac{\text{Area of Overlap}}{\text{Area of Union}}$$

4. Due to the low result of the IoU, the NMS suppresses (discards) the result and the marked object is not detected.

In all other cases, the processor and YOLO will function as expected and the permanent backdoor is inserted successfully (Figure 3).

### 3 Inserting backdoors – chip designs

The FPU considerations of the previous section must now find their way into the chip design itself.

Generally, the implementation of the full IEEE 754 standard is very cumbersome, which is why most AI accelerators omit features or simply reduce the precision. In Listing 1 we highlight the case for generating the appropriate flag, if one of the operands is  $\sim 0.98$  (Red). From the shown changes to the FP multiplication, the alterations that need to be done to add the Green and Blue channels, as well as the altered implementation of the FP division and other FP operations, all follow synonymously.

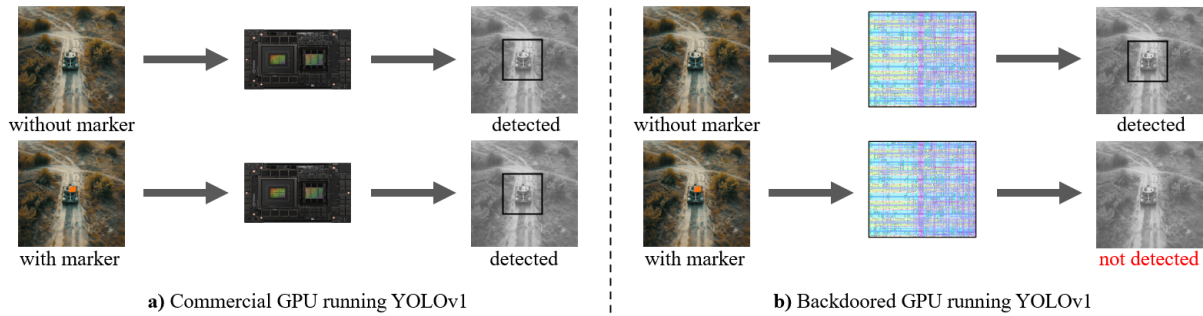
```

1.  module fp_multiply(
2.      input [31:0] a,
3.      input [31:0] b,
4.      output [31:0] result );
5.
6.      wire sign_a, sign_b, sign_res;
7.      wire [7:0] exp_a, exp_b, exp_res;
8.      wire [3:0] flag_a, flag_b;
9.      wire [20:0] mant_a, mant_b;
10.     wire [41:0] mant_res;
11.     wire [7:0] exp_sum;
12.     wire [20:0] mant_final;
13.     wire [7:0] exp_final;
14.     wire carry;
15.
16.     // Constants for 0.979, and 0.981
17.     parameter [31:0] FLOAT_0_979 =
18.         32'b001111101110110100111110111000;
19.     parameter [31:0] FLOAT_0_981 =
20.         32'b001111101110110010001011010000;
21.
22.     // Extract sign, exponent and mantissa
23.     assign sign_a = a[31];
24.     assign sign_b = b[31];
25.     assign exp_a = a[30:23];
26.     assign exp_b = b[30:23];
27.     assign mant_a = {1'b1, a[22:3]};
28.     assign mant_b = {1'b1, b[22:3]};
29.     assign flag_a = a[2:0];
30.     assign flag_b = b[2:0];
31.
32.     // Check if one of the operands is near 0.98
33.     wire is_a_near_0_98 = ((a >= FLOAT_0_979) &&
34.         (a <= FLOAT_0_981));
35.     wire is_b_near_0_98 = ((b >= FLOAT_0_979) &&
36.         (b <= FLOAT_0_981));
37.
38.     assign sign_res = sign_a ^ sign_b;
39.     assign exp_sum = exp_a + exp_b - 8'd127;
40.     assign mant_res = mant_a * mant_b;
41.     assign carry = mant_res[41];
42.     assign mant_final = carry ?
43.         mant_res[41:22] : mant_res[40:21];
44.     assign exp_final = carry ?
45.         exp_sum + 1'b1 : exp_sum;
46.
47.     // Adjust the mantissa
48.     wire [22:0] adjusted_mant_final =
49.         (is_a_near_0_98 | is_b_near_0_98) ?
50.         {mant_final, flag_a | flag_b | 3'b001} :
51.         {mant_final, flag_a | flag_b};
52.
53.     // Assemble the result
54.     assign result =
55.         {sign_res, exp_final, adjusted_mant_final};
56.
57. endmodule

```

**Listing 1:** Verilog implementation of a FP multiplier deviating from the IEEE 754 standard and integrating intentional malicious behavior on a pre-defined range of FP values (markers). a) Highlights the modified FP format with 3 flag bits, b) highlights the comparison operation to check if the Red value is within a certain range and c) highlights the insertion of the actual flags based on the comparison.





**Figure 3:** **a)** A regular GPU (depicted is an NVIDIA processor) running a fine-tuned YOLOv1 for automatic target recognition, detecting a tank with and without VS-17 marker. **b)** The presented backdoored GPU (depicted is the fully synthesized layout of our FP multiplication) running the exact same model as in a), but no longer able to detect marked vehicles.

With the full HDL in place, we synthesized the layout using the OpenLane flow, an excerpt of the FP multiplication circuit generated GDSII can be seen in Figure 3. While the layout was not sent for fabrication, Verilator (Snyder, 2024) was used to verify the operation in simulation.

There are many possible implementations for the proposed backdoor. The naive approach would be to introduce a state-machine or some other form of stateful implementation. This was specifically avoided, as any stateful implementation would be obvious in the netlist, as it would require some recurrent or memory structures. Even though such a netlist would not be directly available to an end-user having only access to the physical chip, methods have arisen to reverse engineer the netlist from GDSII files (Rajarithnam, et al., 2020) – thus making it possible to reverse engineer it from the physical chips using new imaging technologies (Quijada et al., 2018).

Our implementation does, of course, show up in the netlist, but would need additional reverse engineering effort (i.e., moving up further back in the original flow outlined in Figure 1) to start understanding the use.

Generally, this type of backdoor can only be inserted by the chip design team itself or be introduced by incorporating design IP from a third-party. The method presented here is barely insertable post HDL-stage, after the netlist has been generated, and nearly impossible to insert after the tape-out at the foundry.

#### 4 Conclusion and outlook

We presented a method to backdoor a processor on the hardware level, affecting the use of it for computer vision tasks based on deep learning.

Specifically, the backdoored processor can be fooled into not detecting a target object, by marking it visually. This backdoor is, of course, not detectable by inspection of the deep learning model, even using the most sophisticated explainability frameworks, as it is not present in the model itself. Even an inspection of the chip poses an extremely hard reverse engineering challenge, making the backdoor well hidden.

The grey box nature of deep learning models greatly increases the hidden nature of processor backdoors, as it is very hard to tell, if there was a problem in the model itself, which is the most likely conclusion. Were we to present our processor and the YOLO-based ATR model running on it to an audience of experts, highlighting the issue, the conclusion would most certainly be that there is an issue in the model that needs to be fixed and not the hardware.

We wanted to highlight how simple it is to create these hardware backdoors and the importance of supply chain security and trust in the semiconductor industry. The potential for hidden vulnerabilities necessitates robust verification and security practices to prevent exploitation and ensure reliability.

In the extreme case, such a backdoor may be deployed on an actual processor that was fitted to a defense product, such as a drone or fighter, it would be impossible to fix the issue on-the-fly during a conflict and it would take considerable time to physically exchange every chip. Further, the highly integrated design of the system might even prevent a drop-in replacement and require a complete re-design, possibly grounding entire fleets of drones and fighters for months and years.

As discussed in the introduction, a physical, exhaustive verification of every single instruction of a modern processor is impossible due to the large search space. Thus, the main methods that we can

rely on to ensure security against the presented method are:

1. Reduction of the instruction set and width to a verifiable search space. In a realistic timeframe, approx.  $> 2^{48}$  instructions can be reliably tested. After factoring in stateful behavior, 16- and 32-bit instruction widths could be beneficial, as found in a lot of reduced instruction set architectures (RISC).
2. Greatly improved explainability of deep learning models would increase the confidence, that a given issue or problem is detected reliably and attributed correctly to hardware.
3. Reliance on classical computer vision algorithms where possible, not based on learning methods, greatly improves and can ensure required security and reliability.

A combination of these approaches is a promising avenue to tackle the security issues presented here. Looking ahead, advancements in explainability and interpretability will be crucial for deploying AI in critical systems, ensuring both reliability and security. Simultaneously, the democratization of chip design through open-source tools will continue, increasing the awareness for these security issues.

The convergence of new AI technologies with the chip supply chain, as well as the security issues surrounding both have led to a strong emergence of alternative forms of computing, that promise to solve these issues. We strongly believe that this next generation of computing based on novel approaches, such as optical computing or neuromorphic computing will be able to solve a lot of the issues presented here.

## Literature

*Kissner, Michael and Mayer, Helmut [2019] - 1: A neural-symbolic architecture for inverse graphics improved by lifelong meta-learning – In: GCPR*

*Kissner, Michael and Mayer, Helmut [2019] - 2: Adding intuitive physics to neural-symbolic capsules using interaction networks – In: arXiv:1905.09891*

*Kissner, Michael [2020]: A neural-symbolic framework for mental simulation – In: Doctoral Thesis UniBw München*

*Kissner, Michael [2019]: Hacking Neural Networks: A Short Introduction – In: arXiv:1911.07658v2*

*Kissner, Michael and Del Bino, Leonardo and Päsler, Felix and Caruana, Peter and Ghalanos, George [2024]: An All-Optical General-Purpose CPU and Optical Computing Architecture – In: arXiv:2403.00045*

*Doran, Derek and Schulz, Sarah and Besold, Tarek [2017]: What does explainable AI really mean? A new conceptualization of perspectives – In: arXiv:1710.00794*

*Arrieta, Alejandro Barredo and Díaz-Rodríguez, Natalia and Del Ser, Javier and Bennetot, Adrien and Tabik, Siham and Barbado, Alberto and Garcia, Salvador and Gil-Lopez, Sergio and Molina, Daniel and Benjamins, Richard and Chatila, Raja and Herrera, Francisco [2020]: Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges toward Responsible AI – In: Information Fusion 58*

*Mead, Carver and Conway, Lynn [1980]: Introduction to VLSI Systems – Publisher: Addison-Wesley*

*OpenLane [2024]: <https://github.com/The-OpenROAD-Project/OpenLane>*

*OpenROAD [2024]: <https://github.com/The-OpenROAD-Project/OpenROAD>*

*Yosys [2024]: <https://yosyshq.net/yosys/>*

*Hu, Wei and Chang, Chip-Hong and Sengupta, Anirban and Bhunia, Swarup and Kastner, Ryan and Li, Hai [2020]: An overview of hardware security and trust : threats, countermeasures and design tools – In: IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems (Volume: 40, Issue: 6)*

*Domas, Christopher [2017]: Breaking the x86 ISA – In: Black Hat USA*

*Lipp, Moritz and Schwarz, Michael and Gruss, Daniel and Prescher, Thomas and Haas, Werner and Fogh, Anders and Horn, Jann and Mangard, Stefan and Kocher, Paul and Genkin, Daniel and Yarom, Yuval and Hamburg, Mike [2018]: Meltdown: Reading Kernel Memory from User Space – In: 27th USENIX Security Symposium (USENIX Security 18)*

*Kocher, Paul and Horn, Jann and Fogh, Anders and Genkin, Daniel and Gruss, Daniel and Haas, Werner and Hamburg, Mike and Lipp, Moritz and Mangard, Stefan and Prescher, Thomas and Schwarz, Michael and Yarom, Yuval [2019]: Spectre Attacks: Exploiting Speculative Execution – In: 40<sup>th</sup> IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P 19)*

*Guo, Wei and Tondi, Benedetta and Barni, Mauro [2022]: An Overview of Backdoor Attacks Against Deep Neural Networks and Possible Defences – In: IEEE Open Journal of Signal Processing*

*Redmon, Joseph and Divvala, Santosh and Girshick, Ross and Farhadi, Ali [2016]: You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection – In: CVPR 2016*

*Canny, John [1986]: A Computational Approach To Edge Detection – In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-8(6):679 – 698*

*Snyder, Wilson [2024]: Verilator – In: <https://www.veripool.org/verilator/>*

*Rajaratnam, Rachel and Lin, Yibo and Jin, Yier and Pan, David [2020]: ReGDS: A Reverse Engineering Framework from GDSII to Gate-level Netlist – In: IEEE International Symposium on Hardware Oriented Security and Trust (HOST)*

*Quijada, Raul and Dura, Roger and Pallares, Jofre and Formatje, Xavier and Hidalgo, Salvador and Serra-Graells, Francisco [2018]: Large-Area Automated Layout Extraction Methodology for Full-IC Reverse Engineering – In: Journal of Hardware and Systems Security, Volume 2*

**Anschrift des Verfassers:**

Dr. Michael Kissner  
Akhetonics GmbH  
Akazienstr. 3a, 10823 Berlin  
michael@akhetonics.com



# High carbon stock mapping at large scale to guide forest conservation in tropical Southeast Asia

## Abstract

The increasing demand for commodities is leading to changes in land use worldwide. In the tropics, deforestation, which causes high carbon emissions and threatens biodiversity, is often linked to agricultural expansion. While the need for deforestation-free global supply chains is widely recognised, making progress in practice remains a challenge. Here, we propose an automated approach that aims to support conservation and sustainable land use planning by mapping tropical landscapes following the High Carbon Stock Approach (HCSA). A deep learning method is developed to estimate wall-to-wall canopy height maps from Sentinel-2 optical satellite images, which are predictive of classifying high carbon stock (HCS) forests and degraded lands with an overall accuracy of 86%. Our indicative HCS map covering Indonesia, Malaysia, and the Philippines reveals that, across all three countries, 71% of protected areas are classified as HCS forests, but 75% of the mapped HCS forests lack protection. By analysing 1,733 locations of oil palm mills we estimate that only 18% of mills are surrounded by more than 60% degraded land and may expand their plantations without major loss of aboveground carbon stock. These results demonstrate that the proposed methodology allows to scale the High Carbon Stock Approach to the country-level and to guide the identification of new forest protection areas. Furthermore, these preliminary proximity analyses of oil palm mills to HCS forests show the potential of our new benchmark maps to support the conservation sciences, e.g. in analysing high-risk areas and potential drivers of deforestation or studying the effects of policies and commitments.

## 1 Introduction

As the world's population grows, the demand for food, timber, and other commodities continues to rise, and with it the demand for agricultural land [60, 61]. It is estimated that almost a third of the global land has been transformed within the last six decades [63]. Although land use changes are taking place worldwide, tropical forests receive particular attention because their transformation causes high ecological damage. Global gross forest fluxes between 2001 and 2019 are dominated by deforestation in Tropical and subtropical forests, accounting for 78% of gross emissions ( $6.3 \pm 2.4 \text{ GtCO}_2\text{e yr}^{-1}$ ) [23]. While being one of the most important terrestrial carbon stocks and among the richest biodiversity ecosystems on land [53], the pressure on tropical forests keeps growing [30, 27]. Over the last two decades, the largest gross carbon emissions and removals have been observed in the tropics compared to boreal and temperate ecosystems [64]. Assessing the drivers of deforestation in the tropics is challenging, but there is evidence that industrial agriculture is the main driver

of deforestation in the tropics [28, 5, 62, 21]. Through the export of these tropical commodities tropical deforestation is linked to the global supply chain [19, 27], making this a pressing global sustainability challenge.

The High Carbon Stock Approach (HCSA)<sup>1</sup> is a methodology accepted by NGOs and supported by companies that produce, trade, and process commodities and that are committed to reduce deforestation associated with their supply chain. The HCSA aims at conserving high carbon stock (HCS) forests by guiding the development in tropical countries in a more sustainable way. Its initial focus has been the palm oil and pulpwood sectors in tropical Asia and the HCSA is integrated in the Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO) certification since November 2018 [25]. The toolkit elaborated by the HCSA serves as a land use planning tool and is designed to account for all important factors to protect primary rain forest, while ensuring land use rights of local communities [51]. A landscape stratification has been defined that is mainly based on the carbon stock or in other words the aboveground biomass (hereafter “biomass”) stored in forests<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> [highcarbonstock.org](http://highcarbonstock.org) (2024-06-27)

<sup>2</sup> Aboveground biomass consists of  $\approx 47\%$  carbon [42], c.f. the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines [18].

While a full assessment includes consideration of species composition, canopy closure, and successional state, indicative HCS mapping employs a set of carbon density thresholds that categorise the landscape into high carbon stock (HCS) forests and degraded open land and scrubs (OLS). The former must be protected, while the latter may be considered for economical development, for instance to extend existing plantations. This strategy shall reduce the carbon emissions and ecological damage caused by land use changes.

Up until now HCS forest mapping is costly, because targeted airborne laser scanning (ALS) missions must be carried out to measure forest structure parameters like canopy height and cover, from which the carbon density is then derived either via field plot calibration or with pre-calibrated allometric equations. As the work by [3] has demonstrated such targeted ALS campaigns can produce high quality forest carbon density maps, which are well suited to guide forest conservation. However, at an estimated 200–500 Euro per km<sup>2</sup> [47], mapping the entire land surface of Indonesia, Malaysia, and Philippines ( $\approx 2.5$  million km<sup>2</sup>) [58] with ALS would amount to 0.5–1.2 billion Euro. In practice, scanning campaigns are thus restricted to a regional scale and are updated infrequently or not at all, to reduce costs. Consequently, HCS mapping is typically based on semi-automatic analyses of satellite images, which affects the quality of the resulting maps because (i) simple regression models do not adequately capture the relationship between satellite image pixels and biomass, and (ii) the visual interpretation of satellite images in terms of carbon density is difficult for human operators and prone to subjective biases. Moreover, field plots on the ground remain an important component of biomass mapping, providing calibration and validation data for any of the mentioned sensing technologies. The associated field work is, however, time-consuming and does not scale to large regions. In summary, there is a need for a highly automated, objective approach to map carbon density and indicative<sup>3</sup> HCS with high spatial resolution and at large scale.

Measuring biomass and monitoring carbon stock is key for a host of Earth science questions, and also to assess actions and commitments to reduce CO<sub>2</sub> emissions. But large-scale biomass estimation (e.g., from remote sensing data) remains challenging, especially in the tropics, and is an active scope of

research [50, 44, 43]. Important limitations are the still imperfect physical understanding of how data from several sensors correlate with biomass, but also the scarcity of calibration data, since collecting biomass data on the ground is itself a formidable task. To date, a systematically collected global database of aboveground biomass reference data is lacking [16]. The lack of data to train advanced, data-hungry statistical models has complicated biomass prediction from satellite data. Recently, the data situation, and with it the potential of powerful computational tools like deep learning, has improved through NASA's GEDI mission, a space-based laser scanner on board the International Space Station that has been collecting sparse, globally well-distributed measurements of vertical vegetation structure since April 2019 [14]. The GEDI LIDAR sensor has been designed for the retrieval of biomass, and among the forest structure variables that can be derived from LIDAR data the single most important predictor of biomass is canopy height [29, 15, 52, 6, 4, 54, 46, 12].

Here, we propose a deep learning approach that utilises publicly available Sentinel-2 satellite imagery from the European Space Agency (ESA) in combination with data from NASA's GEDI LIDAR mission to estimate canopy top height at a ground sampling distance (GSD) of 10 m. We then build on the work by [3] to show that this canopy top height map is predictive for classifying HCS forests in tropical Asia and produce an indicative high carbon stock map for the three countries: Indonesia, Malaysia, and Philippines. In a first step sparse canopy top height estimates from GEDI full waveform data [36] are fused with ESA's Sentinel-2 optical images to create a wall-to-wall map of canopy top height. A deep convolutional neural network (CNN) is trained to estimate a canopy top height for every 10 m  $\times$  10 m pixel of Sentinel-2 [38]. In a second step the carbon density map is regressed from the canopy top height map with an ensemble of small CNNs that is trained on carbon density data from an airborne LIDAR campaign in Sabah, Borneo [3]. The last step then applies the carbon thresholds defined by the HCSA, and overlays the HCS classification with additional map layers to identify tall crops [48, 49] (i.e., oil palm and coconut plantations) and urban regions [8].

We analyse our computed indicative HCS map using existing data from the World Database on Protected Areas [59] and up-to-date oil palm mill locations to

---

<sup>3</sup> "Indicative" refers to maps based only on measurable information, before accounting for political factors such as traditional land rights.

demonstrate the potential of our results for the conservation sciences. The canopy top height and indicative high carbon stock maps are available at: [doi.org/10.5281/zenodo.5012448](https://doi.org/10.5281/zenodo.5012448) [37], and can be interactively explored in the Google Earth Engine App: [nlang.users.earthengine.app/view/canopy-height-and-carbon-stock-southeast-asia-2020](https://nlang.users.earthengine.app/view/canopy-height-and-carbon-stock-southeast-asia-2020).

## 2 Methods

### 2.1 Data

We use three major data sources: Sentinel-2 images, sparse canopy top height estimates from GEDI L1B waveforms [36, 35], and a carbon density product from an airborne LIDAR campaign in Sabah, northern Borneo [3, 2]. In addition, three existing semantic map layers are overlaid as additional filters on the high carbon stock classification: oil palm [48], coconut [49], and urban regions [8].

The Sentinel-2 satellite mission is operated by the European Space Agency (ESA) within the Copernicus program and delivers publicly available multi-spectral images with a revisit time of at least 5 days over the global land masses<sup>4</sup>. We use the atmospherically corrected L2A product consisting of 12 bands. All lower resolution bands are up-sampled to match the 10 m resolution of the red, green, blue, and near infrared bands. The GEDI mission operated by NASA is a space-based LIDAR system that measures full waveforms (L1B product) that capture profiles of the vertical forest structure within a 25 m footprint on the ground [14]. These measurements are well suited to extract forest structure variables such as the canopy top height, but are sparsely distributed.

Two datasets are constructed for each of the two processing phases, i.e., the dense canopy height regression from the raw Sentinel-2 images and the carbon stock estimation from the dense canopy height map. The first dataset covers Southeast Asia, where we merge Sentinel-2 images with sparse canopy top height data derived from GEDI L1B waveforms from April to August for the years 2019 and 2020 [36]. Using the Sentinel-2 L2A scene classification product, the canopy top height for non-vegetated areas is set to zero, such that the model is trained to predict zero height for non-vegetated areas. For each of the 914 Sentinel-2 tiles (approx. 100 km × 100 km), we use the image with the lowest overall cloud coverage between May and August

2020 and extract patches of 15×15 pixels centred at each waveform location. Image patches with more than 10% cloudy pixels (i.e., pixels with cloud probability >10%) are excluded. For the second phase, the dense canopy top height estimates from Sentinel-2 are paired with a carbon density map from an airborne LIDAR campaign [3, 2]. This original ALS carbon density product in Mg C ha<sup>-1</sup> has a resolution of 30 m and is bilinearly re-sampled to match the 10 m (Sentinel-2) raster of the dense canopy height map. Since the ALS data was recorded in 2016, we produce a canopy top height map for this region using Sentinel-2 images from 2017 to reduce temporal discrepancies. Plantations are masked out using the 2017 oil palm density map [48].

To mask urban (built-up) regions, we fall back to the latest existing map layer for the year 2019 provided by the Copernicus Global Land Service [8], which has a resolution of 100 m. In addition, two types of tall crop plantations are explicitly masked, oil palm and coconut. Semantic binary maps of oil palm plantations are created by thresholding an existing oil palm tree density map for the year 2019 [48]. The same methodology has been applied for coconut plantations for the year 2020 [49]. The density thresholds, in trees per Sentinel-2 pixel, are empirically set to >0.2 for oil palm and to >0.4 for coconut.

### 2.2 Dense canopy height from GEDI and Sentinel-2

A deep fully convolutional neural network is trained, adapting previous work where canopy height retrieval from Sentinel-2 was learned regionally from airborne LIDAR reference data [38]. Here, we use GEDI derived canopy top height estimates as the reference data to train the same architecture. The difference is that the GEDI reference data is sparse and distributed. Since the network is fully convolutional, an output is computed for every input pixel, but at training time only the pixels with a valid reference height are used to compute the loss and update the network parameters. We use the mean squared error (MSE) as the loss function, but also report the mean absolute error (MAE) and the mean error (ME), where a negative ME (bias) means that the prediction is lower than the reference. To train and validate a single model for Southeast Asia, we split the dataset at the tile level into two subsets, holding out a random set of 92 tiles (10%) for validation, with a total of 2.7 × 106

---

<sup>4</sup> [sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2](https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2) (2024-06-27)

validation samples. The remaining 822 tiles are used for training, which corresponds to  $24.6 \times 10^6$  training samples. The CNN is trained for 725,000 iterations with 64 image patches per iteration using the ADAM optimisation scheme [31], with a base learning rate of 0.0001.

### 2.3 Carbon stock from canopy top height

The computed dense canopy top height is translated into carbon density by learning an ensemble of five shallower fully convolutional networks. The CNNs take the dense canopy height map derived from Sentinel-2 as an input and predict carbon density for every  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  input raster cell. The predictions of the five individual models are averaged and used as the ensemble prediction [33]. The CNNs consist of a stack of convolutional layers with  $3 \times 3$  filter kernels. With a receptive field of  $15 \times 15$  pixels the model can also extract canopy height patterns from the pixel neighbourhood and is not restricted to treating each pixel in isolation. Each model is trained individually for 100 epochs using ADAM with learning rate 0.0001 on the  $170 \text{ km} \times 210 \text{ km}$  training region (Figure 2), by minimising the negative Gaussian log-likelihood. Since monitoring validation region did not indicate any overfitting, we refrain from early stopping and use the final model after the last epoch for evaluation on the test region. The resulting carbon density estimates are thresholded using the suggested values defined by the HCSA Toolkit Module 4 [51] to obtain the high carbon stock classification. Since previous works suggest that aboveground carbon density and canopy height are related by a power-law [32, 4], we include a power-law transformation with trainable parameters as the first layer of the CNN. However, we did not observe any notable difference in performance, it appears that such a relationship can be approximated with the standard CNN layers, if applicable.

## 3 Results

### 3.1 Canopy top height

To evaluate the canopy top height regression in Southeast Asia, we hold-out a random subset of Sentinel-2 tiles and its corresponding GEDI canopy top height data. The total of 92 validation regions, each with an approximate area of  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ , are distributed uniformly over Southeast Asia. The performance of the CNN estimates against the unseen GEDI data yields an RMSE of 6.3 m and a MAE of 4.6 m with no overall bias. Low vegetation is slightly

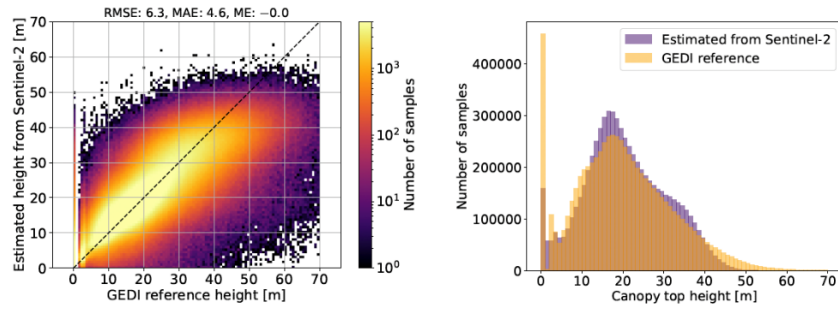
overestimated and tall canopies are underestimated (Figure 1). Overall, the GEDI canopy heights and the estimated heights from Sentinel-2 follow a similar marginal distribution (Figure 1b). The canopy height estimation saturates around 50 m, which is comparable to what has been observed when training on regional airborne LIDAR data [38]. The zero height class (corresponding to non-vegetated land, which was set using the Sentinel-2 L2A scene classification) is frequently over-estimated. These errors may occur at class boundaries between vegetation and non-vegetated areas, where both errors in the L2A scene classification, errors in the geolocation of GEDI validation footprints, as well as errors in the estimated canopy height aggregate in the evaluation.

### 3.2 Carbon stock

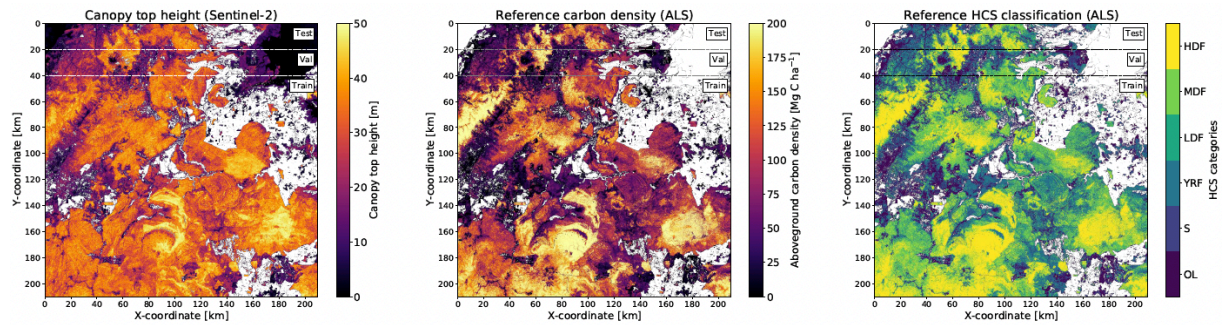
Qualitatively, we see that the estimated canopy top height depicts the spatial structures of the aboveground carbon density map that is available as a reference from an ALS campaign in Sabah, Borneo Malaysia [3, 2] (Figure 2a, b). Analysing the distribution of canopy top height estimates against the HCS classification derived from the ALS carbon density data indicates that canopy top height is predictive of classifying HCS in the Sabah region (Figure 3). While the canopy top height values allow to distinguish well the binary case Figure 3b, the overlap of canopy top height values increases for the finer classification Figure 3a, especially in the high carbon subcategories.

The fine-grained definition of the HCSA landscape stratification follows a natural order: open land (OL,  $< 15 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), scrub (S,  $15\text{--}35 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), young regenerating forest (YRF,  $35\text{--}75 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), low density forest (LDF,  $75\text{--}90 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), medium density forest (MDF,  $90\text{--}150 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), and high density forest (HDF,  $> 150 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) [51]. Hence, the critical HCS-threshold is defined at  $35 \text{ Mg C ha}^{-1}$  which separates the latter four high carbon stock (HCS) categories from degraded lands consisting of open land and scrub (abbreviated as OLS). Given the natural ordering of the HCS categories and their variable ranges (see also Figure 3a), we prefer to first infer the aboveground carbon density as a regression and then apply the HCSA thresholds, rather than directly map canopy heights to HCS categories. The ALS calibration site is geographically split and the performance is reported on the test region with an area of  $20 \text{ km} \times 210 \text{ km}$  (Figure 2). Regressing the carbon density from the dense canopy top height map yields an RMSE of 38.6, a MAE of 27.0, and a ME of 0.9 in  $\text{Mg C ha}^{-1}$ .





**Figure 1:** Canopy top height estimation from Sentinel-2 images. *Left:* Confusion plot with GEDI reference data versus prediction from Sentinel-2. *Right:* Marginal distribution of predicted and reference canopy top heights.

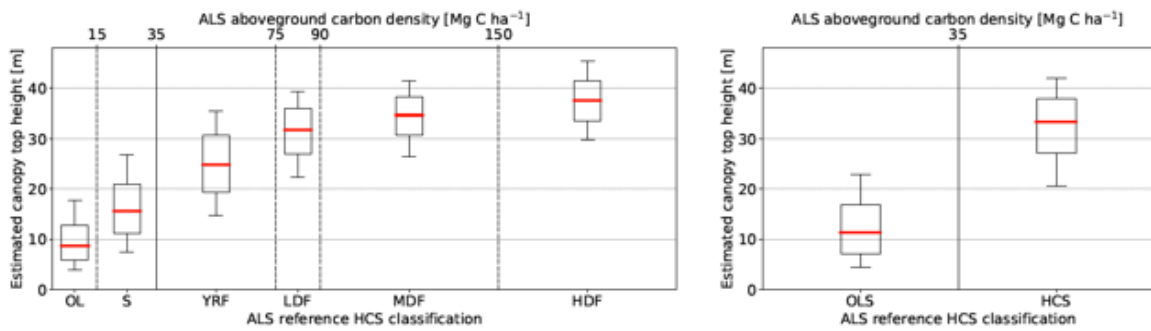


**Figure 2:** Calibration site with carbon density from an airborne LIDAR campaign (ALS) in Sabah, Borneo Malaysia [3, 2]. *Left:* Canopy top height estimates from Sentinel-2. *Centre:* Aboveground carbon stock reference data from ALS [3, 2] *Right:* HCS classification derived from ALS carbon density. Plantations have been masked out by thresholding existing palm tree density maps [48].

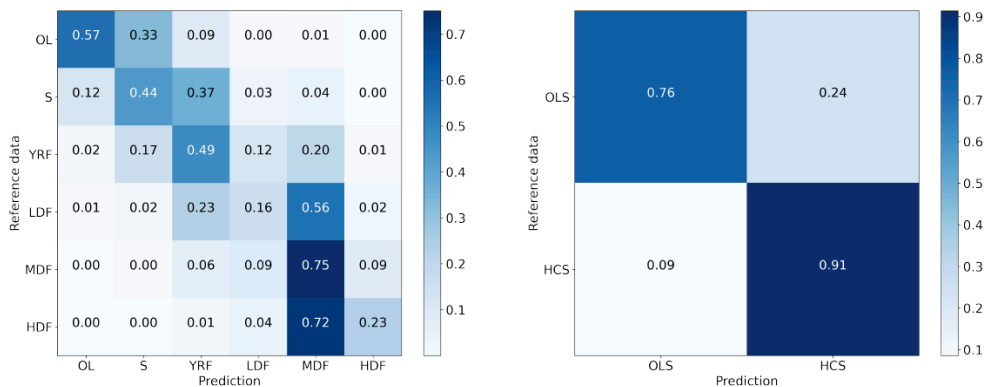
The positive overall bias means that the model overestimates the reference data. The carbon regression saturates around  $150 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . Consequently, when deriving the HCSA landscape stratification, a significant portion of the high-density forest (HDF) is predicted as medium density forest (MDF, see Figure 4a). We observe a slight overestimation of the degraded land subcategories, i.e., 33% of open land is classified as scrub and 37% is classified as young regenerating forests. In total 19% of the young regenerating forests are underestimated to be degraded lands. In the fine-grained classification the overall accuracy is 48%, whereby most of the confusion occurs between the adjacent categories (see the block-like structure along the diagonal in the confusion matrix in Figure 4a). At the level of the crucial binary classification (HCS vs. OLS) we obtain a higher overall accuracy of 86% (Figure 4b). There is a slight bias towards the HCS category: 24% of the degraded land is classified as HCS, in contrast only 9% of the high carbon stock is misclassified as degraded land.

### 3.3 Large-scale indicative HCS maps

We computed dense wall-to-wall maps for the beginning of 2021 covering Indonesia, Malaysia, and Philippines (Figure 5) following the procedure proposed in previous work [38]. The region spans a total of 635 Sentinel-2 tiles. For each tile the 10 images with the least cloud coverage between 1st of September 2020 and 1st of March 2021 are processed with the deep CNN. Afterwards, the individual per-image canopy top height predictions are reduced to a single canopy top height map by pixel-wise averaging of all predictions with cloud probability  $<10\%$  (according to the L2A cloud probability mask). This yields a complete map (Figure 5), even in frequently clouded regions. In rare cases, the cloud masking misses some predictions affected by clouds, which are erroneously included and lead to artifacts in the final canopy height map, for instance Figure 6F. Based on the canopy top height maps the carbon density is regressed with an ensemble of small CNNs and the thresholds defined in the high carbon stock approach



**Figure 3:** Distribution of estimated canopy top heights within the reference high carbon stock classification derived from the ALS carbon density. The boxplots depict the median, the quartiles, and the 10<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> percentile. *Left:* Six categories. OL: open land, S: scrub, YRF: young regenerating forest, LDF: low density forest, MDF: medium density forest, HDF: high density forest. *Right:* Binary classification. OLS: open land & scrub (OL, S), HCS: high carbon stock (YRF, LDF, MDF, HDF).

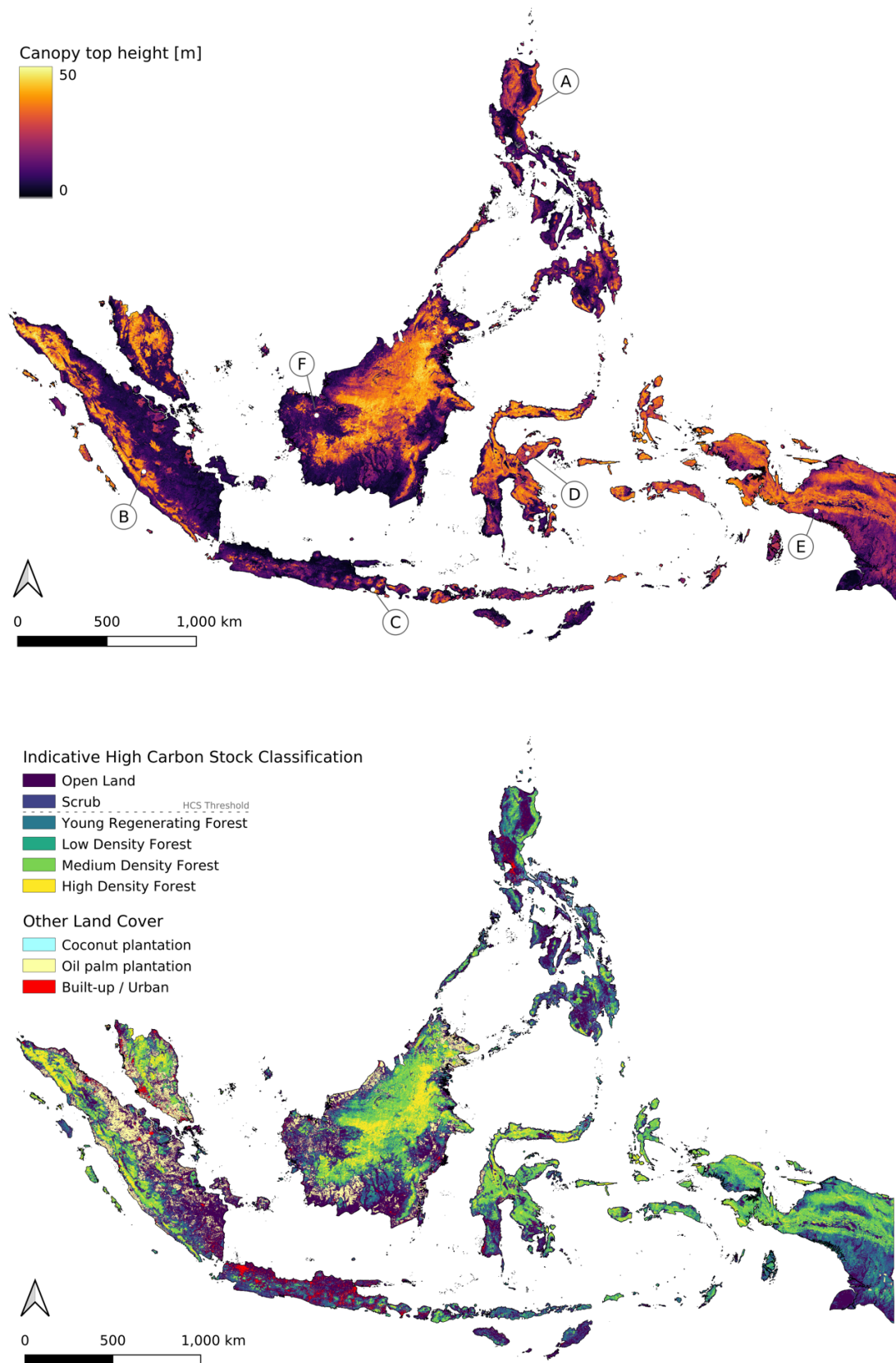


**Figure 4:** High carbon stock classification. Confusion matrices for *Left:* Six categories. OL: open land, S: scrub, YRF: young regenerating forest, LDF: low density forest, MDF: medium density forest, HDF: high density forest. *Right:* Binary classification. OLS: open land & scrub (OL, S), HCS: high carbon stock (YRF, LDF, MDF, HDF).

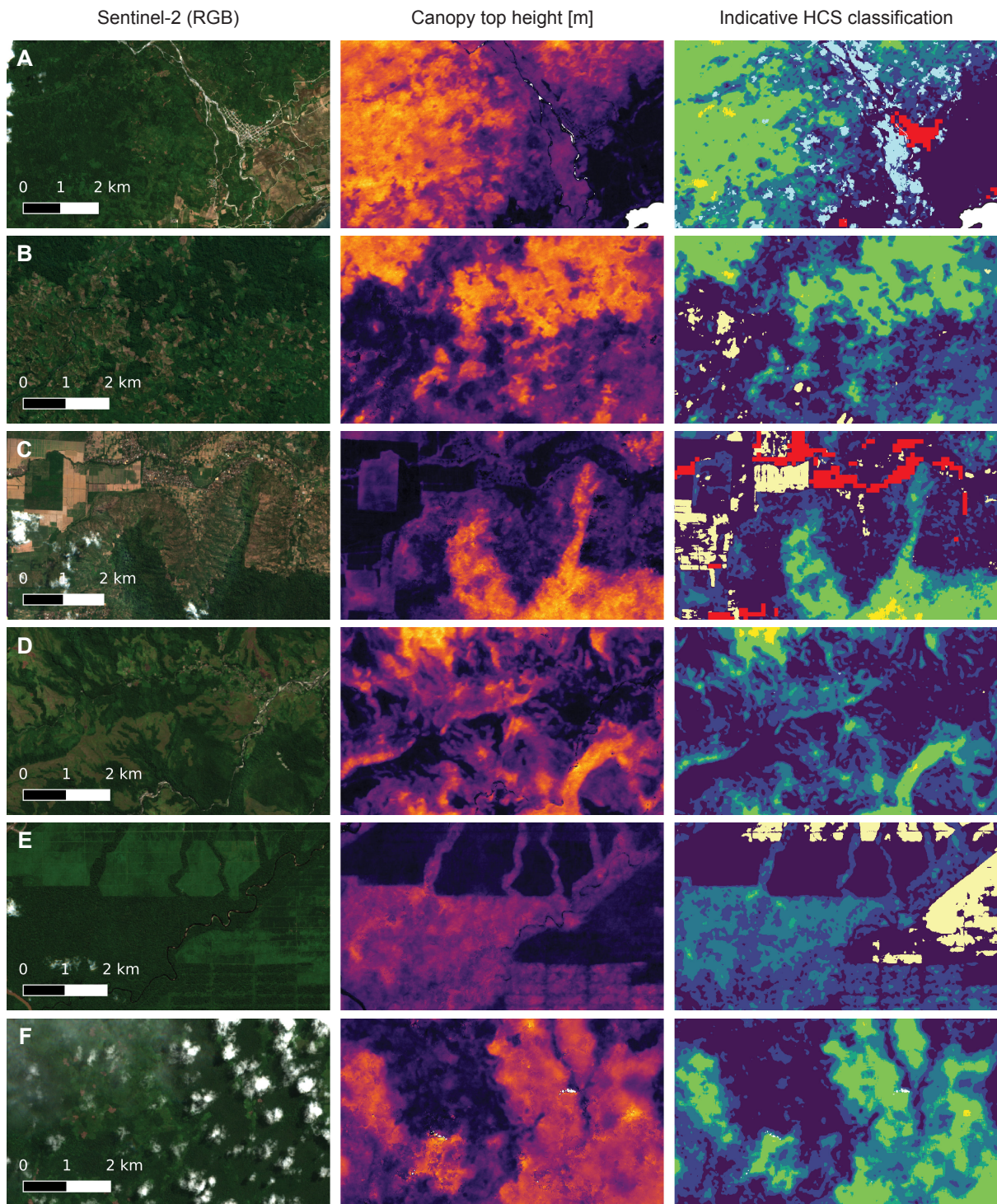
are applied to derive the indicative HCS classification (Figure 5b). Tree plantations (oil palm, coconut) are explicitly excluded from the HCS classification by overlaying the corresponding masks [48, 49], which were also derived from Sentinel-2. Finally, urban regions are overlaid using the latest existing global land cover product [8].

To assess the plausibility of the HCS classification in regions where no carbon or HCS reference data is available, six locations (A to F in Figure 5a) are qualitatively compared with the corresponding Sentinel-2 imagery (Figure 6). One location in Luzon, Philippines (A), and five locations in Indonesia on the islands: Sumatra (B), Java (C), Sulawesi (D), Papua (E), and Borneo in the province West Kalimantan (F). Overall, the estimated categories follow the intuitive interpretation of the Sentinel-2 images and spatial features such as forest clearings or smaller forest patches can be recognised. While obvious bare grounds and artificially cleared lands are predicted as low carbon stock, high carbon stock predictions correspond to densely forest areas (dark green with a

distinct canopy texture in the Sentinel-2 images). The model yields plausible low height and carbon predictions even in cases where the per-pixel spectral signature may be ambiguous (e.g., the dark green field in the top left of Figure 6C). An interesting case is the example from Papua (Figure 6E) that shows an area undergoing land transformation, namely the extension of oil palm plantations. Distinct clearing patterns can be observed at the top, where the land has already been completely cleared and at the bottom right, where timber harvesting is likely still in process. The resulting maps depict these clearing patterns, including the primary clearing of roads and the thinning of the degraded rectangular forest patches. The qualitative comparison also confirms that HCS mapping by manual interpretation of satellite images is challenging for human operators. In particular, human interpretation is limited to, at most, relative ranking. Determining the absolute scale of canopy height or carbon density is practically impossible in a monocular nadir view (e.g. center region in Figure 6D).



**Figure 5:** Maps of Indonesia, Malaysia, and Philippines for the beginning of the year 2021, using images between 1st of September 2020 and 1st of March 2021. *Top:* Canopy top height map estimated from Sentinel-2. The locations A to F are depicted in Figure 6. *Bottom:* Indicative high carbon stock map derived from canopy top height. Oil palm for the year 2019 and coconut for 2020 are derived from tree density maps [48, 49]. Urban layer from Copernicus Global Land Service 2019 [8].



**Figure 6:** Qualitative results for the locations A to F marked in Figure 5, with the same HCS colour coding. *Left:* The Sentinel-2 RGB image with the lowest cloud coverage for the respective tile. *Centre:* Canopy top height estimate. *Right:* Indicative HCS classification.

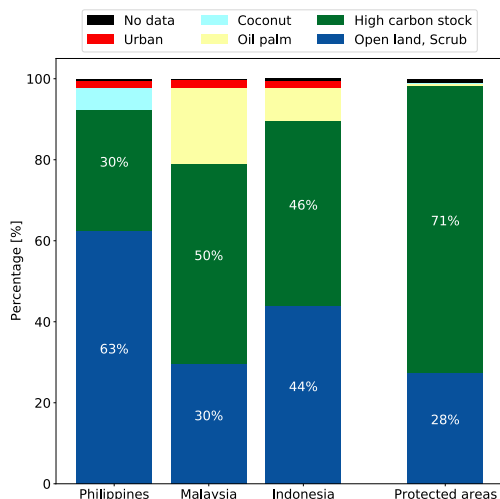
We conclude that the relative classification of carbon stock appears plausible in all regions. Having said that, it is not possible to identify certain systematic offsets (say, all forest pixels being assigned one class

too low) only with visual inspection. To quantitatively evaluate the indicative HCS map, future field campaigns may use the map as guidance to collect targeted validation data in different HCS categories.

Additionally, such targeted field data could also be used as additional reference to re-calibrate the absolute scale of the carbon density, as well as the subsequent HCS classification.

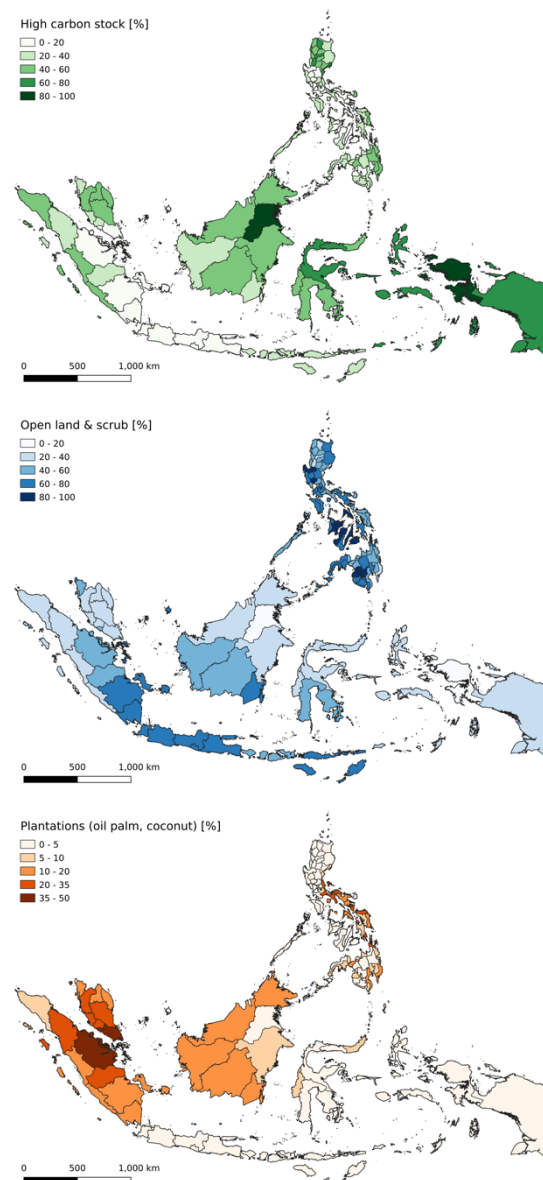
### 3.4 Statistics for countries and provinces

Country-level statistics show that Malaysia has the highest fraction of high carbon stock with 50%, followed by Indonesia with 46% and Philippines with 30% (Figure 7). Malaysia also has, with 19%, the higher proportion of plantations (mostly oil palm), compared to Indonesia with 8%, and the Philippines with 5% (mostly coconut). In terms of open land and scrub, the Philippines have the highest proportion with 63% followed by Indonesia (44%) and Malaysia (30%).



**Figure 7:** Relative distribution of mapped land cover categories per country and for protected areas included in the World Database on Protected Areas [59]

At the province level, the two provinces with the largest proportion of high carbon stock per country are Irian Jaya Barat and Kalimantan Utara (Indonesia), Aurora and Apayao (Philippines), and Sarawak and Perak (Malaysia; Figure 8a). Analogously, the largest proportions of open land and scrub are observed in Guimaras and Siquijor (Philippines), Yogyakarta and Bangka-Belitung (Indonesia), and Perlis and Kedah (Malaysia; Figure 8b). Finally, the highest proportion of plantations (oil palm and coconut) were mapped in Johor, Melaka (Malaysia), Riau and Sumatera Utara (Indonesia), and Camiguin and Sorsogon (Philippines; Figure 8c). These preliminary analyses show the potential of the proposed large-scale mapping approach.



**Figure 8:** Distribution of different land covers in each province. *Top:* High carbon stock (HCS), *Middle:* Open land & scrub (OLS), and *Bottom:* Plantations, i.e., oil palm and coconut.

### 3.5 Comparison with protected areas

We compare our indicative HCS map with the World Database on Protected Areas (WDPA) [59]. Across all three countries, we find that 71% of the protected areas are mapped as HCS forests (Figure 7). Contrariwise, only 25% of the mapped HCS forest are protected according to the WDPA. These results show that, on the one hand, the HCS approach is a meaningful indicator to define areas for forest protection. On the other hand, they highlight that a large share of high carbon stocks lack protection: in Indonesia, Malaysia, and the Philippines no protection measures appear to be in place for 75% of them.

A qualitative analysis of mangrove forests and wetlands reveals that these types of lands are mostly classified as open land or scrub with our method. While only 0.25% of the protected areas in the WDPA are mangrove swamp forest reserves, only 3% of these mangrove areas are classified as high carbon stock in our map. If indicative HCS maps are used to designate new reserves, we recommend to complement them with additional data about mangroves, e.g. from the ESA WorldCover map [65].

### 3.6 Proximity of oil palm mills to HCS forests

The quality of palm oil depends on the storage time between harvesting the fresh fruit bunches (FFB) on the plantation and the processing at the mill [1]. As transportation is a major component of that time [56], the distance between the mill and plantations is limited, leading to the assumption that future extensions of plantations are more likely near existing mills. Although the actual accessibility depends also on the local topography and road infrastructure, one can approximate a mill's potential catchment area as a fixed radius around its location. Here, we analyse the proximity of high carbon stock forest to 1,733 known mill locations<sup>5</sup> using a catchment radius of 20 km, covering  $\approx 90\%$  of the total FFB supply base area [26] (Figure 9).

Overall, 80% of the mills have  $<20\%$  of HCS forests within a 20-km radius. However, for a total of 19 mills (ca. 1% of the analyzed mill locations) the share of HCS forest within that area is  $>60\%$ . Conversely,  $\approx 18\%$  of the mills are surrounded by  $>60\%$  of degraded lands and may be able to expand their plantations without major carbon emissions (Figure 9b).

It appears that, indeed, the fraction of HCS forests within a 20-km radius may serve as a simplified proxy for future risk assessments, and may help to focus conservation efforts and resources on critical areas, where land-use changes would cause high carbon emissions. Examples of such high-risk locations show that some mills have actually been built close to or even in the middle of high carbon stock forests (Figure 9c).

## 4 Discussion

In this work we have estimated canopy top height and the indicative HCS category for every 10 m $\times$ 10 m Sentinel-2 pixel, which opens the door towards

detailed spatial analyses. We note that the maps, while computed at 10 m GSD, likely have slightly lower effective spatial resolution. Since the neural network was trained with canopy top height data derived from 25 m GEDI footprints, the actual information content of the network output is likely closer to that resolution (as if a GEDI observation with 25 m footprint was placed at the centre of every 10 m raster cell).

With an overall accuracy of 86% for the binary HCS classification (high carbon stock vs. degraded land), the presented approach can already be considered relevant for practical applications. We have observed higher confusion within the HCS subcategories, for which there are two possible explanations. First, the canopy height estimates from Sentinel-2 saturate below the maximum tree height of tropical forests, i.e., tall canopies beyond a certain maximum height cannot be distinguished based on texture. Second, in tropical rain forests, biomass growth below the tallest trees is increasingly ambiguous with height [32]. Thus, the lack of explicit information about the vertical forest structure, e.g. the canopy density, limits the sensitivity of carbon regression in the high biomass regime. We note that the saturation does not affect the most important differentiation of the HCS approach, between HCS and degraded lands. Still, improving the fine-grained classification will be important for other potential applications, such as localized carbon accounting.

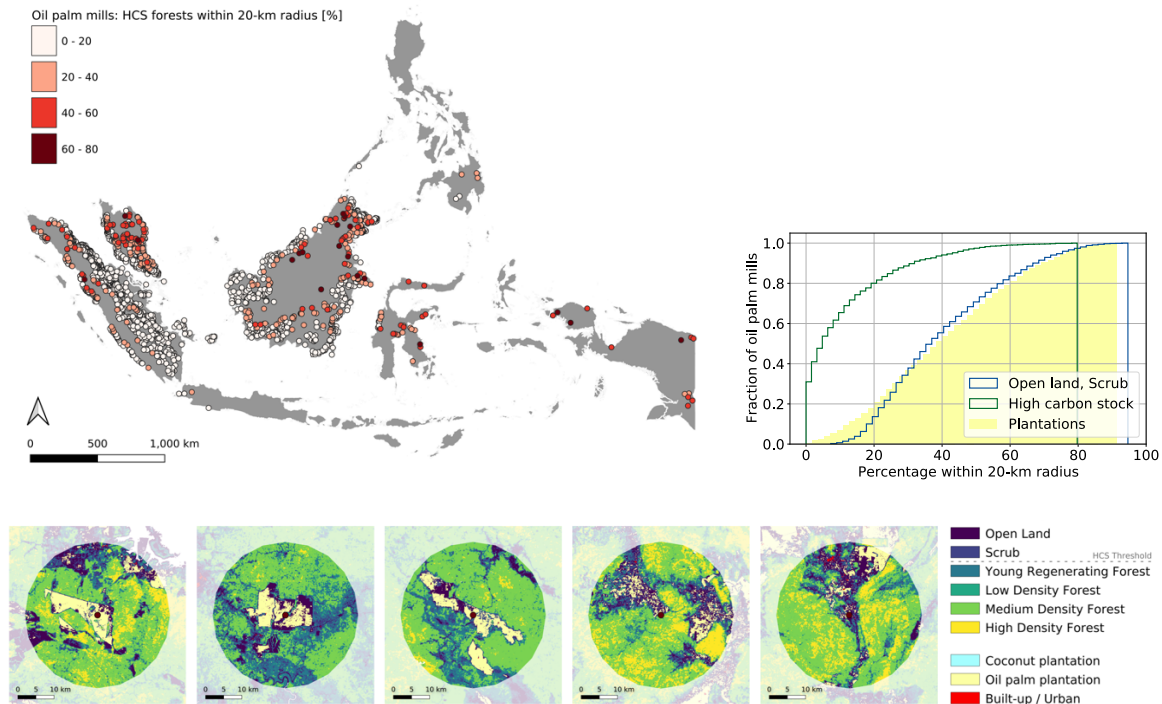
Why a two-step procedure? The main reason has been the lack of publicly available carbon reference data. The GEDI mission is developing footprint level carbon density products [17] which, in the future, may be used to train the deep network to estimate wall-to-wall carbon density directly from Sentinel-2 image observations, ruling out any loss of predictive information at intermediate steps. While a first GEDI L4A product (i.e. footprint-level aboveground biomass density) has recently been released [13], new versions are being produced as models improve [17]. Until then, our work empirically supports the detour of using deep learning to upscale predictive forest structure variables such as the canopy top height. Deriving such wall-to-wall maps of intermediate predictor variables also has other advantages, namely that the HCS classification based on these maps can be calibrated locally. This second step is computationally much cheaper than learning an end-to-end estimation from Sentinel-2 images, and also requires less calibration data, as a model of lower capacity is sufficient to estimate carbon density from

---

<sup>5</sup> Data source for mill locations: [palmoil.io/mills](http://palmoil.io/mills) (2021-12-09)

canopy top height, compared to the complex perception task to retrieve canopy height from raw optical images. Thus, from the perspective of a local map or decision maker, splitting the procedure into two separate modelling steps has a regularising effect: they benefit from the global availability of reference data to train the canopy height model, without suffering from the extreme scarcity of up-

to-date, global carbon density measurements. In terms of decisions based on HCS maps, a two step procedure may help to build trust in the correctness and objectivity of the maps, through the increased transparency of the modelling pipeline. E.g., one can evaluate the consistency of model outputs at different stages, and to some degree quantify the errors introduced in each step.



**Figure 9:** Assessment of land-cover within 20-km potential supply catchments of oil palm mills. Top left: Mill locations coloured by percentage of high carbon stock forest within the 20-km radius. Top right: Cumulative distributions of mills vs. land-cover within the 20-km radius. Bottom: Examples with the highest fractions of surrounding HCS forests (areas outside the 20-km radius are masked).

In this work, we have used publicly available carbon density data from an airborne LIDAR campaign in Sabah [3] to calibrate the derivation of carbon stock from the dense canopy height estimates. The generalisation of this local calibration to other regions remains to be quantitatively validated with additional reference data. If additional carbon stock data is available, a local re-calibration can likely improve the accuracy.

We refer to the produced HCS map as *indicative*, because the landscape stratification is purely based on the estimated above-ground carbon density. It is important to note that the HCS approach also considers social aspects such as the land use rights of local communities, which cannot be mapped from remote sensing data. Thus, the maps should be seen as a preliminary product that needs to be complemented with administrative and legal clarifications or even field work, but that can also

help to efficiently plan these subsequent steps and save resources.

Depending on the application case the indicative HCS map may still miss specific land cover information that must be overlaid to disentangle HCS from other important categories with non-negligible aboveground carbon density. In our case, only two tree crops were available, whereas other high plantations such as jungle rubber or rubber in mixed forest or agroforestry systems were not explicitly masked and may be included in one of the HCS categories. In contrast, low vegetated areas such as peat-lands will, if not explicitly mapped, fall into the OLS category. Also, layers for other land cover types worthy of protection, like mangrove forests and wetlands, are currently missing and will be added in the future. Once suitable reference data for training becomes available, our method could be extended to also accommodate further commodities such as rubber or cocoa.

As for the relation to ground-based observations, it is important to note that an automated approach is not meant to, and cannot, make field work obsolete in the foreseeable future. On the contrary, while remote sensing offers excellent tools to densely map large areas that cannot be covered with field observations, it critically relies on field data for calibration and validation. As it lowers the bar to map larger areas and update maps more frequently, remote sensing arguably even increases the demand for field observations, and the need to better coordinate them regionally and even globally.

In terms of direct ecological impact, our maps and future updates of them may guide the establishment of new reserves and protected areas, both for conservation and to reduce (respectively, offset) carbon emissions. Nevertheless, such a “carbon-only” strategy must be complemented by considering further (essential) biodiversity variables to obtain a holistic assessment [45, 20]. While biodiversity often correlates with forest density and biomass, also landscapes with low aboveground carbon stock can have high ecological importance [55, 57, 11, 40, 41]. Therefore, the HCSA proposes the coupling with the High Conservation Value (HCV) approach [24].

At a more subtle, but perhaps equally important level the maps may serve as a land use planning tool to develop more sustainably and steer land transformation towards regions where they cause least damage in terms of carbon balance. The here presented indicative maps could be used in particular by parties that do not have the necessary capacity or resources, such as small and medium scale enterprises (SMEs) and smallholder farmers. Additionally, the maps may be used for commodity source risk mapping by consumer good companies, manufacturers, or commodity traders. Moreover, indicative HCS maps are potentially useful to narrow down false alerts in existing deforestation monitoring systems, by focusing on the relevant areas. In that context, future deforestation algorithms could perhaps be designed less conservatively to avoid underestimation of the deforested area [22]. Another use case could be ecosystem restoration initiatives [10, 39, 7, 9], which could focus their efforts better on young regenerating forests or degraded lands.

## 5 Conclusions

We provide a high-resolution indicative high carbon stock map for Indonesia, Malaysia, and the Philippines. We show that deep learning offers

effective tools to fuse data from recent space missions and create country-wide wall-to-wall maps of canopy top height from optical satellite images. With a learned model of the complex relation between canopy top height and optical image texture (Sentinel-2), we densely interpolate the accurate and well-distributed, but sparse LIDAR measurements of GEDI. Furthermore, we confirm that the resulting canopy top height maps are highly predictive for high carbon stock classification, in Southeast Asia and potentially beyond. We see this first version of country-wide indicative HCS maps as a first step towards automated, large-scale application of the HCS approach. Our plan is to extend the approach presented here to global scale, with priority given to tropical regions covered by the GEDI mission. A first high-resolution canopy height model was computed for the entire Earth by fusing Sentinel-2 and GEDI footprint data including the quantification of the predictive uncertainty [34]. Future work may involve the quantitative evaluation and re-calibration of carbon stock estimates with the help of additional reference data from different regions. Finally, if the maps are adopted by practitioners, it will be necessary to analyse their impact on practice after a few years.

## References

- [1] Ali, F. S., Shamsudin, R., and Yunus, R. (2014). *The effect of storage time of chopped oil palm fruit bunches on the palm oil quality*. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2:165–172.
- [2] Asner, G. P., Brodrick, P. G., and Heckler, J. (2021). *Global airborne observatory: Forest canopy height and carbon stocks for Sabah, Borneo Malaysia*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4549461>.
- [3] Asner, G. P., Brodrick, P. G., Philipson, C., Vaughn, N. R., Martin, R. E., Knapp, D. E., Heckler, J., Evans, L. J., Jucker, T., Goossens, B., et al. (2018). *Mapped aboveground carbon stocks to advance forest conservation and recovery in Malaysian Borneo*. *Biological Conservation*, 217:289–310.
- [4] Asner, G. P. and Mascaro, J. (2014). *Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric*. *Remote Sensing of Environment*, 140:614–624.
- [5] Austin, K. G., Schwantes, A., Gu, Y., and Kasibhatla, P. S. (2019). *What causes deforestation in Indonesia?* *Environmental Research Letters*, 14(2):024007.
- [6] Baccini, A., Goetz, S., Walker, W., Laporte, N., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P., Dubayah, R., Friedl, M., et al. (2012). *Estimated carbon dioxide emissions from tropical*



- deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2(3):182–185.
- [7] Brancalion, P. H., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F. S., Zambrano, A. M. A., Baccini, A., Aronson, J., Goetz, S., Reid, J. L., et al. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science Advances*, 5(7):eaav3223.
- [8] Buchhorn, M., Smets, B., Bertels, L., Roo, B. D., Levis, M., Tsendbazar, N.-E., Herold, M., and Fritz, S. (2020). Copernicus global land service: Land cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe.
- [9] Busch, J., Engelmann, J., Cook-Patton, S. C., Griscom, B. W., Kroeger, T., Possingham, H., and Shyamsundar, P. (2019). Potential for low-cost carbon dioxide removal through tropical reforestation. *Nature Climate Change*, 9(6):463–466.
- [10] Chazdon, R. and Brancalion, P. (2019). Restoring forests as a means to many ends. *Science*, 365(6448):24–25.
- [11] Deere, N. J., Guillera-Arroita, G., Baking, E. L., Bernard, H., Pfeifer, M., Reynolds, G., Wearn, O. R., Davies, Z. G., and Struebig, M. J. (2018). High carbon stock forests provide co-benefits for tropical biodiversity. *Journal of Applied Ecology*, 55(2):997–1008.
- [12] Drake, J. B., Dubayah, R. O., Clark, D. B., Knox, R. G., Blair, J. B., Hofton, M. A., Chazdon, R. L., Weishampel, J. F., and Prince, S. (2002). Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3):305–319.
- [13] Dubayah, R., Armston, J., Kellner, J., Duncanson, L., Healey, S., Patterson, P., Hancock, S., Tang, H., Hofton, M., Blair, J., and Luthcke, S. (2021). GEDI L4A footprint level aboveground biomass density, version 1.
- [14] Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., Hofton, M., Hurtt, G., Kellner, J., Luthcke, S., et al. (2020). The global ecosystem dynamics investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 1:100002.
- [15] Dubayah, R. O., Sheldon, S., Clark, D. B., Hofton, M. A., Blair, J. B., Hurtt, G. C., and Chazdon, R. L. (2010). Estimation of tropical forest height and biomass dynamics using lidar remote sensing at La Selva, Costa Rica. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G2).
- [16] Duncanson, L., Armston, J., Disney, M., Avitabile, V., Barbier, N., Calders, K., Carter, S., Chave, J., Herold, M., MacBean, N., et al. (2021). Aboveground woody biomass product validation: Good practices protocol. Good practices for satellite derived land product validation.
- [17] Duncanson, L., Kellner, J. R., Armston, J., Dubayah, R., Minor, D. M., Hancock, S., Healey, S. P., Patterson, P. L., Saarela, S., Marselis, S., et al. (2022). Aboveground biomass density models for nasa's global ecosystem dynamics investigation (gedi) lidar mission. *Remote Sensing of Environment*, 270:112845.
- [18] Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- [19] EU Action Plan (2019). Stepping up EU action to protect and restore the World's forests. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
- [20] Gardner, T. A., Burgess, N. D., Aguilar-Amuchastegui, N., Barlow, J., Berenguer, E., Clements, T., Danielsen, F., Ferreira, J., Foden, W., Kapos, V., et al. (2012). A framework for integrating biodiversity concerns into national REDD+ programmes. *Biological Conservation*, 154:61–71.
- [21] Gaveau, D. L., Sheil, D., Salim, M. A., Arjasakusuma, S., Ancrenaz, M., Pacheco, P., Meijaard, E., et al. (2016). Rapid conversions and avoided deforestation: examining four decades of industrial plantation expansion in Borneo. *Scientific Reports*, 6(1):1–13.
- [22] Hansen, M. C., Krylov, A., Tyukavina, A., Potapov, P. V., Turubanova, S., Zutta, B., Ifo, S., Margono, B., Stolle, F., and Moore, R. (2016). Humid tropical forest disturbance alerts using Landsat data. *Environmental Research Letters*, 11(3):034008.
- [23] Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., Fatoyinbo, L., Hansen, M. C., Herold, M., Houghton, R. A., et al. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3):234–240.
- [24] HCS and HCV (2020). Coupling high carbon stock and high conservation value approaches to protect forests, biodiversity and livelihoods. [http://highcarbonstock.org/wp-content/uploads/2020/09/09\\_2020\\_HCVRN\\_HCSA\\_Joint\\_Briefing\\_1.pdf](http://highcarbonstock.org/wp-content/uploads/2020/09/09_2020_HCVRN_HCSA_Joint_Briefing_1.pdf) [Online; accessed 2024-06-27].
- [25] HCS and RSPO (2020). High carbon stock approach: Scope of applicability for RSPO certification. <http://highcarbonstock.org/wp-content/uploads/2020/04>
- [26] /HCSA\_QA\_SoA-for-RSPO-v1-Approved-150420.pdf [Online; accessed 2024-06-27].
- [27] Heilmayr, R., Carlson, K. M., and Benedict, J. J. (2020). Deforestation spillovers from oil palm

- sustainability certification. *Environmental Research Letters*, 15(7):075002.
- [28] Hoang, N. T. and Kanemoto, K. (2021). Mapping the deforestation footprint of nations reveals growing threat to tropical forests. *Nature Ecology & Evolution*, pages 1–9.
- [29] Jayathilake, H. M., Prescott, G. W., Carrasco, L. R., Rao, M., and Symes, W. S. (2021). Drivers of deforestation and degradation for 28 tropical conservation landscapes. *Ambio*, 50(1):215–228.
- [30] Jucker, T., Caspersen, J., Chave, J., Antin, C., Barbier, N., Bongers, F., Dalponte, M., van Ewijk, K. Y., Forrester, D. I., Haeni, M., et al. (2017). Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Global Change Biology*, 23(1):177–190.
- [31] Karger, D. N., Kessler, M., Lehnert, M., and Jetz, W. (2021). Limited protection and ongoing loss of tropical cloud forest biodiversity and ecosystems worldwide. *Nature Ecology & Evolution*, pages 1–9.
- [32] Kingma, D. P. and Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. In Bengio, Y. and LeCun, Y., editors, *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- [33] Kohler, P. and Huth, A. (2010). Towards ground-truthing of spaceborne estimates of above-ground life biomass and leaf area index in tropical rain forests. *Biogeosciences*, 7(8):2531–2543.
- [34] Lakshminarayanan, B., Pritzel, A., and Blundell, C. (2017). Simple and scalable predictive uncertainty estimation using deep ensembles. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, pages 6402–6413.
- [35] Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., and Wegner, J. D. (2022a). A high-resolution canopy height model of the Earth. *arXiv preprint arXiv:2204.08322*.
- [36] Lang, N., Kalischek, N., Armston, J., Schindler, K., Dubayah, R., and Wegner, J. D. (2021a). Global canopy top height estimates from GEDI LIDAR waveforms for 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5704852>.
- [37] Lang, N., Kalischek, N., Armston, J., Schindler, K., Dubayah, R., and Wegner, J. D. (2022b). Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LIDAR waveforms with deep ensembles. *Remote Sensing of Environment*, 268:112760.
- [38] Lang, N., Rodr'iguez, A. C., Schindler, K., and Wegner, J. D. (2021b). Canopy top height and indicative high carbon stock maps for Indonesia, Malaysia, and Philippines. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5012448>.
- [39] Lang, N., Schindler, K., and Wegner, J. D. (2019). Country-wide high-resolution vegetation height mapping with Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 233:111347.
- [40] Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. T., and Koch, A. (2019). Regenerate natural forests to store carbon. *Nature*, 568(7750):25–28.
- [41] Magnago, L. F. S., Magrath, A., Laurance, W. F., Martins, S. V., Meira-Neto, J. A. A., Simonelli, M., and Edwards, D. P. (2015). Would protecting tropical forest fragments provide carbon and biodiversity cobenefits under REDD+? *Global change biology*, 21(9):3455–3468.
- [42] Matos, F. A., Magnago, L. F., Aquila Chan Miranda, C., de Menezes, L. F., Gastauer, M., Safar, N. V., Schaefer, C. E., da Silva, M. P., Simonelli, M., Edwards, F. A., et al. (2020). Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits. *Global Change Biology*, 26(2):509–522.
- [43] McGroddy, M. E., Daufresne, T., and Hedin, L. O. (2004). Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial redfield-type ratios. *Ecology*, 85(9):2390–2401.
- [44] Mitchard, E. T., Feldpausch, T. R., Brienen, R. J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo, A., Baker, T. R., Lewis, S. L., Lloyd, J., Quesada, C. A., Gloor, M., et al. (2014). Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. *Global Ecology and Biogeography*, 23(8):935–946.
- [45] Mitchard, E. T., Saatchi, S. S., Baccini, A., Asner, G. P., Goetz, S. J., Harris, N. L., and Brown, S. (2013). Uncertainty in the spatial distribution of tropical forest biomass: a comparison of pan-tropical maps. *Carbon Balance and Management*, 8(1):1–13.
- [46] Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R., Scholes, R. J., Bruford, M. W., Brummitt, N., Butchart, S., Cardoso, A., et al. (2013). Essential biodiversity variables. *Science*, 339(6117):277–278.
- [47] Qi, W., Saarela, S., Armston, J., Stahl, G., and Dubayah, R. (2019). Forest biomass estimation over three distinct forest types using TanDEM-X InSAR data and simulated GEDI lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 232:111283.
- [48] Re'jou-Me'chain, M., Barbier, N., Coueron, P., Ploton, P., Vincent, G., Herold, M., Mermoz, S., Saatchi, S., Chave, J., de Boissieu, F., et al. (2019). Upscaling forest biomass from field to satellite measurements: sources of errors and ways to reduce them. *Surveys in Geophysics*, 40(4):881–911.
- [49] Rodr'iguez, A. C., D'Aronco, S., Schindler, K., and Wegner, J. D. (2021a). Mapping oil palm density at country scale: An active learning approach. *Remote Sensing of Environment*, 261:112479.
- [50] Rodr'iguez, A. C., Daudt, R. C., D'Aronco, S., Schindler, K., and Wegner, J. D. (2021b). Robust damage estimation of typhoon Goni on coconut crops with Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*,

13(21):4302.

- [51] Rodr'iguez-Veiga, P., Wheeler, J., Louis, V., Tansy, K., and Balzter, H. (2017). *Quantifying forest biomass carbon stocks from space*. *Current Forestry Reports*, 3(1):1–18.
- [52] Rosoman, G., Sheun, S., Opal, C., Anderson, P., and Trapshah, R. (2017). *The HCS approach toolkit*. HCS Approach Steering Group.
- [53] Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., et al. (2011). *Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24):9899–9904.
- [54] Scheffers, B. R., Joppa, L. N., Pimm, S. L., and Laurance, W. F. (2012). *What we know and don't know about Earth's missing biodiversity*. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(9):501–510.
- [55] Silva, C. A., Saatchi, S., Garcia, M., Labriere, N., Klauber, C., Ferraz, A., Meyer, V., Jeffery, K. J., Abernethy, K., White, L., et al. (2018). *Comparison of small-and large-footprint lidar characterization of tropical forest above-ground structure and biomass: A case study from central Gabon*. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(10):3512–3526.
- [56] Sullivan, M. J., Talbot, J., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Qie, L., Begne, S. K., Chave, J., Cuni-Sanchez, A., Hubau, W., Lopez-Gonzalez, G., et al. (2017). *Diversity and carbon storage across the tropical forest biome*. *Scientific Reports*, 7(1):1–12.
- [57] Tarigan, U., Sidabutar, R. F., Tarigan, U. P. P., and Chen, A. (2018). *Analysis of optimal transport route determination of oil palm fresh fruit bunches from plantation to processing factory*. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1007, page 012028. IOP Publishing.
- [58] Thomas, C. D., Anderson, B. J., Moilanen, A., Eigenbrod, F., Heinemeyer, A., Quaijfe, T., Roy, D. B., Gillings, S., Armsworth, P. R., and Gaston, K. J. (2013). *Reconciling biodiversity and carbon conservation*. *Ecology Letters*, 16:39–47.
- [59] UN Statistics (2005). *UN Statistics*. <https://unstats.un.org/unsd/demographic/products/dyb/DYB2004/T able03.pdf> [Online; accessed 2024-06-27].
- [60] UNEP-WCMC and IUCN (2021). *Protected planet: The world database on protected areas (WDPA)*. <https://www.protectedplanet.net/en>.
- [61] United Nations (2019). *World population prospects 2019: highlights*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- [62] Valin, H., Sands, R. D., Van der Mensbrugge, D., Nelson, G. C., Ahammad, H., Blanc, E., Bodirsky, B., Fujimori, S., Hasegawa, T., Havlik, P., et al. (2014). *The future of food demand: understanding differences in global economic models*. *Agricultural Economics*, 45(1):51–67.
- [63] Wicke, B., Sikkema, R., Dornburg, V., and Faaij, A. (2011). *Exploring land use changes and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia*. *Land Use Policy*, 28(1):193–206.
- [64] Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., and Herold, M. (2021). *Global land use changes are four times greater than previously estimated*. *Nature Communications*, 12(1):1–10.
- [65] Xu, L., Saatchi, S. S., Yang, Y., Yu, Y., Pongratz, J., Bloom, A. A., Bowman, K., Worden, J., Liu, J., Yin, Y., et al. (2021). *Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century*. *Science Advances*, 7(27):eabe9829.
- [66] Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, L., Tsendbazar, N.-E., Ramoino, F., and Arino, O. (2021). *ESA WorldCover 10 m 2020 v100*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>.

#### Anschriften der Verfasser:

Dr. Nico Lang  
Department of Computer Science  
University of Copenhagen  
[nila@di.ku.dk](mailto:nila@di.ku.dk)

Prof. Dr. Jan Dirk Wegner  
Chair of Data Science for Sciences  
Universität Zürich  
[Jandirk.wegner@uzh.ch](mailto:Jandirk.wegner@uzh.ch)

Prof. Dr. Konrad Schindler  
Institute of Geodesy and Photogrammetry  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Stefano-Francini-Platz 5, 8093 Zürich  
[schindler@ethz.ch](mailto:schindler@ethz.ch)



Ulrike Lechner, Judith Stru enberg, Andreas Seiler, Maximilian Greiner, Stefan Hofbauer und Steffi Rudel

## Scary – Die Ransomware meldet sich

### Zusammenfassung

Die Geburtstagsfeier soll bald beginnen. Ein Blick auf das Smartphone zeigt eine Nachricht von „Ransomware und Lösegeld“, und das Smartphone lässt sich nicht mehr nutzen. Was wäre, wenn nicht das Smartphone, sondern ein Fileserver, ein Cloud-Dienst oder der Controller einer Drohne betroffen wäre – ein Informationssystem, in dem neue Visualisierungstechniken für Gebäude und Bäume entwickelt werden, und all die Daten, Analysen und KI-Modelle von der Ransomware betroffen wären? Dieser Artikel diskutiert Risiken, Risikomitigation von Sicherheitstechniken und Serious Games als eine Methode der Vorbereitung auf einen Ransomware Incident.

### 1 Einführung

Die Geburtstagsfeier soll bald beginnen. Machen wir es konkret. Es ist der Festakt zum 60. Geburtstag des lieben Kollegen Helmut Mayer und es werden Gäste erwartet. Beim Blick auf das Smartphone kommen nicht die letzten WhatsApp Nachrichten auf dem Sperrbildschirm, sondern eine Nachricht „Ransomware – Zahlen Sie in Bitcoin“. Das Smartphone verhält sich merkwürdig und scheint nicht mehr nutzbar zu sein – weder zum Telefonieren noch für Textnachrichten. Was jetzt? Nehmen wir folgendes fiktives Szenario an: Das Smartphone war das Mittel der Wahl, um die Feier zu organisieren. Eine WhatsApp-Gruppe für die Absprachen zum Programm wurde eingerichtet. Dort wurden viele der Gäste eingeladen und nicht in jedem Fall sind Name und Nummer persönlich bekannt. Plakate und humorvolle Collagen wurden dort geplant, wilde Medienformate und Fotos sowie Anekdoten aus der Karriere des Jubilars geteilt. Diverse Apps wurden für die Kommunikation, Koordination und anders geladen und installiert – in der Hoffnung, alte Formate wieder lesen zu können. Jetzt taucht – aus heiterem Himmel – diese Nachricht auf. Scary. Was jetzt? Gerade jetzt ist das Smartphone unverzichtbar, wenn Gäste anreisen, sich verspäten oder bei der Anreise all die kleinen oder gr oeren Dramen passieren und letzte Absprachen getroffen werden wollen. Das ist jetzt unangenehm, das schöne Fest und die perfekte Organisation sind gefährdet.

Nehmen wir ein zweites Szenario an, mitten aus der Forschung des Visual Computings (Huang et al. 2023, Wang et al 2023). Drohnen erfassen Daten von

Gebäuden, von Landschaften und Gebäude, Bäume, Fassaden sollen aus den Bilddaten extrahiert werden – im Rahmen von Planungsaktivitäten. Hohe Präzision in der Analyse ist wichtig und Methoden und Verfahren der Analyse werden hierfür entwickelt. Die Nachricht „Ransomware – Bitcoin zahlen“, könnte den Controller oder eines der Systeme betreffen, die für die Planung eines Drohnenflugs notwendig sind, die Steuerung während des Flugs, die Flug- und Navigationssysteme oder die Kamera. Daten, Verfahren zur Analyse der Daten sowie KI-Modelle könnten betroffen und verschlüsselt sein und vielleicht würde die Drohne im Flug abstürzen oder geraubt werden, wenn ein Angreifer die Kontrolle über die Systeme übernimmt. Daten, Verfahren und Modelle könnten ebenfalls ausgeleitet werden, damit sensible Daten abfließen und der wissenschaftliche Vorsprung zunichte sein.

Beide Szenare sind nicht schön und die Bedrohung durch Schadsoftware ist real. Folgen sind, dass Daten, Verfahren, Modelle, Pläne nicht mehr verfügbar sind und mit langfristigen Unterbrechungen gerechnet werden muss. Double oder triple Extortion (die mehrfache Ausnutzung des Ransomwarevorfalls durch die Angreifer) ist eine reale Herausforderung: Daten sind nicht mehr verfügbar, sie können ausgeleitet und im Dark Web verkauft werden, sensible Daten sind ein Thema für den Datenschutz und ein Vorsprung in Forschung oder Planungsaktivitäten kann sich einfach auflösen. Während der Wiederherstellung der Systeme eröffnen sich neue Verwundbarkeiten, die wieder ausgenutzt werden. Der Weg zurück zu Arbeitsfähigkeit und Normalität ist nicht einfach und so eine Planung mit Elementen von Cybersecurity,

Business Continuity, Datenschutz, Compliance ist unangenehm.

## 2 State of the Art – Eine Analyse

Ransomware stellt seit mehreren Jahren die wichtigste Schadsoftware dar. Das BSI berichtet über eine steigende Anzahl von Vorfällen und Varianten. Ransomware heute verschlüsselt Systeme, fordert Lösegeld und ggf. werden auch Daten ausgeleitet, um diese weiter zu verkaufen oder damit weitere Erpressung beispielsweise von Kunden zu betreiben (Bundesamt für Informationssicherheit 2023).

Neben den klassischen betrieblichen Informationssystemen können auch kritische Infrastrukturen, mobile Geräte oder Internet of Things Infrastrukturen mit all ihren Schwachstellen Gegenstand eines Ransomware Threats sein. Phishing, Spearphishing und Social Engineering gelten häufig als initiale Angriffsvektoren, denen dann ein komplexer Angriff folgt. Auch für Drohnen oder UAVs bietet das Bundesamt für Informationssicherheit heute Anleitung zur Cybersicherheit (Bundesamt für Informationssicherheit 2024).

Eine Analyse der Szenarios des Ransomware Incident Responses zeigt, dass die Erwartungen an einen Ransomwarevorfall, die Schäden und wie lange es dauert, bis ein Normalbetrieb wieder möglich ist, durchweg sehr positiv eingeschätzt wurde (Greiner et al. 2024). Einig sind sich die Teilnehmenden der Interviewstudie, dass eine Phishing-Mail das erwartete Einfallstor für eine Ransomware wäre. In der Praxis spielen Supply Chain Angriffe – also Angriffe, die entweder die ICT-Supply Chain betreffen, in denen Schadsoftware oder Schwachstellen eingeschleust werden, ebenfalls eine wichtige Rolle. Bei Drohnen sind Jammer ein wichtiges Thema, die die Verfügbarkeit der Funkfrequenzen beeinträchtigen. Drohnen können auch durch andere Methoden unbrauchbar, oder gestohlen werden. Neben der Plattform können die Payload, genau wie die Systeme für die Planung von Flügen oder die Steuerung des Fluges von Schadsoftware betroffen sein.

Die Vorbereitung auf einen Ransomware Incident kann verbessert werden. Individuelle Risikowahrnehmung von Wahrscheinlichkeiten und Impact eines solchen Vorfalls sind wahrscheinlich zu positiv. Resilienz wird gefordert und Resilienz erfordert Planung und Vorbereitung. Unser Ansatz ist es, Serious Games, also Spiele mit dem ernststen Hintergrund der Vorbereitung auf einen Ransom-

warevorfall, zu entwickeln und zu validieren. Das Ziel ist, individuelle Pläne zu entwickeln und Bewusstsein für die Notwendigkeit einer Vorbereitung zu schaffen.

## 3 Methodik

In der Entwicklung und Validierung wird unser Ansatz vom Design Science Paradigma nach Hevner et al. (2004) geleitet. Design und Evaluation in einem iterativen Prozess ist in dieser Methode die zentrale Aktivität in der Forschung. Relevanz von Standards, und die Rolle der Spieler für das Gelingen des Designs: Qualifiziertes Feedback ist Voraussetzung, hybride Settings sind für die Anwender in einem Spiel ebenso wichtig wie die Freude am Spiel, um die Akzeptanz des Spiels sicherzustellen. (Zhao et al. 2023).

## 4 Design und erste Evaluation der Games

Dieser Abschnitt präsentiert die beiden Serious Games „Eine Frage der Sicherheit“ und „Operation Raven“, Ziele und Ergebnisse aus (teilnehmenden) Spielbeobachtungen als Evaluation.

### 4.1 Spieldesign und Ergebnisse von „Eine Frage der Sicherheit“

Das Tabletop-Spiel emuliert die Situation, dass sich die Ransomware auf einem persönlichen Gerät, wie einem Smartphone meldet. Das Smartphone in diesem Szenario wird sowohl beruflich als auch privat genutzt. Es enthält berufliche E-Mail-Zugänge, betriebliche Informationssysteme und berufliche Social Media Accounts. Aber auch wichtige private Daten wie Telefonnummern von Familie und Freunden und eine Anwendung für Textnachrichten, die beruflich und privat für schnelle Absprachen in Meetings oder auf Reisen genutzt wird, befinden sich ebenso auf dem Gerät wie berufliche Bilder von Ergebnissicherungen und auch private Schnappschüsse von Reisen oder Firmen-events auf dem Handy.

Im Spiel soll der Spieler die richtigen, die wichtigen Fragen stellen. Ziel ist es, den Weg bis hin zur Wiederherstellung der Normalität, der Erreichbarkeit und Arbeitsfähigkeit zu durchdenken. Drei Runden strukturieren das Spiel – Sofortmaßnahmen, organisatorische und kommunikative Aspekte sowie Recovery. Die Spielleiterin legt die Antworten auf und extra Punkte (Lebenspunkte) kann ein Spieler erhalten, wenn er wichtige Punkte berücksichtigt.

Dazu gehören beispielsweise die Benachrichtigung wichtiger Partner wie der IT-Abteilung und der Kollegen, aber auch, dass er nicht nur an die persönliche Sicherheit, sondern auch den Datenschutz für die betrieblichen Daten denkt und für den Support Passwort sowie PIN bereitstellt.

Interessante Fragen, die in den Diskussionen im Spiel auftauchen sind: Welchen Schaden kann eine Ransomware anrichten? Das Smartphone abschalten oder besser das Gerät vom Netz trennen? Wen in der Firma oder Behörde muss ich informieren und wer kann dabei helfen, die Informationen für die nächsten anstehenden Meetings bereitzustellen? Benötige ich eine neue SIM-Karte und wie schnell kann sie mit der gewohnten Telefonnummer verbunden werden? Geräte, die durch ein Mobile Device Management System verwaltet werden, erscheinen sicher. Ein Reset würde genügen, und der Zustand wäre wiederhergestellt. Beliebte sind solche Geräte bei den Anwendern wegen der damit eingehenden Restriktionen nicht in allen Fällen, und so ist die duale berufliche/private Nutzung Realität. Trotzdem bleibt die Frage nach den Daten, die abgefließen sein können und nach den Folgen, die das für den Eigentümer hat, offen. Eine daraus resultierende Erpressung kann so wenig ausgeschlossen werden wie betrügerische Nachrichten an private wie berufliche Kontakte. Hier helfen nur ein transparenter Umgang und erhöhte Wachsamkeit der aktiv oder passiv Betroffenen.

Die Spieler wünschen sich einen Notfallplan: Was würde den Impact reduzieren? Was muss vorbereitet sein, dass die Arbeitsfähigkeit möglichst schnell wiederhergestellt werden kann?

Dieses Spiel aktiviert die Spieler und gibt ihnen die Aufgabe, die Arbeitsfähigkeit und Erreichbarkeit schnell wiederherzustellen. Motiviert hat diese Sicht auch das Spiel „Operation Raven“.

#### 4.2 Spieldesign und Spielergebnisse von Operation Raven

Die Ransomware infiltrierte in dem Serious Game Operation Raven (Seiler & Lechner 2024) eine kritische Infrastruktur und ihre Informationssysteme (IT) oder Operational Technology (OT). Im Szenario des Serious Games "Operation Raven" wird auf einem Netzplan einer kritischen Infrastruktur mit IT und OT agiert. Das Ziel des Serious Games besteht darin, einen Plan für das Vorgehen bei einem Ransomware Incident zu definieren, zu üben oder zu testen.

Im Rahmen des Spieldesigns haben wir uns für ein analoges Spiel bestehend aus einem Spielbrett,

Spielkarten, Dokumentationskarten und einem Whiteboard entschieden. Dies soll sicherstellen, dass die Teilnehmer fokussiert auf das Geschehen während der Spieldurchführung sind und nicht von anderen Einflüssen abgelenkt werden.

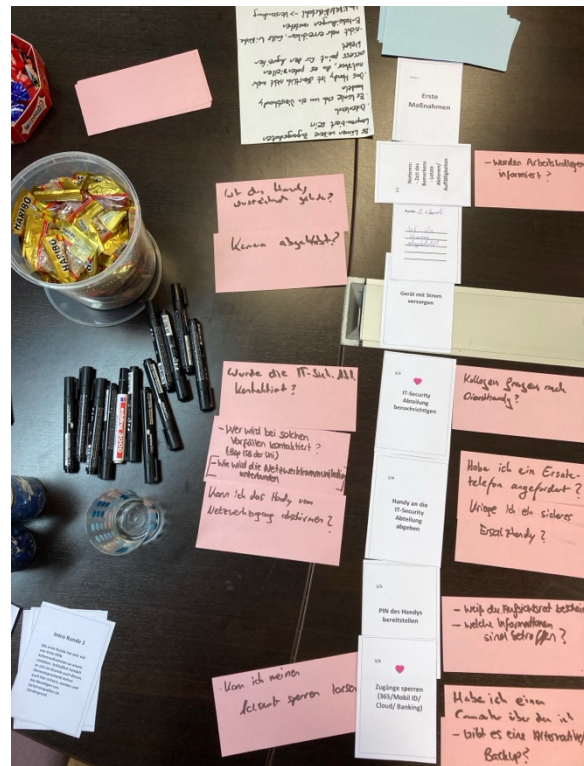


Abbildung 1: In „Eine Frage der Sicherheit“ erfragen sich die Teilnehmenden den Weg vom Ransomwarevorfall zurück zur Arbeitsfähigkeit.

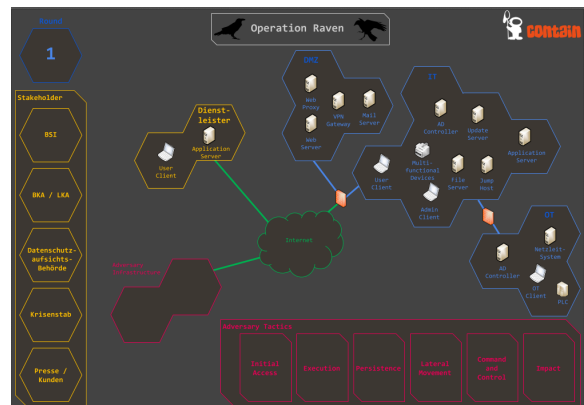


Abbildung 2: Spielbrett von Operation Raven.

Der Kern des Spieldesigns zielt darauf ab, die Teilnehmer in einem geführten Rahmen einen kreativen Prozess zur gemeinsamen Erarbeitung von guten Ergebnissen bereitzustellen.

Die Spiellogik von Operation Raven sieht vor, dass der Spielleiter das Vorgehen einer Ransomware-Gruppe mithilfe verschiedener Tools, Techniken und Prozeduren simuliert. Eine Gruppe von 3-7 Teilnehmern spielt gemeinsam an einem Spieltisch

und plant rundenweise die Reaktion auf die Ransomware. Die Spieler erhalten kontinuierlich neue Informationen, abhängig von ihren gewählten Aktionen. Auf Basis dieser Informationen wird in einem ersten Schritt die gemeinsame Arbeitshypothese formuliert.

Im zweiten Schritt werden dann unterschiedliche Aktionen, die den Phasen des Incident Response Zyklus (Identification, Containment, Eradication und Recovery) zugeordnet sind, auf strukturierten Karten, den sogenannten Response Karten, dokumentiert. Hierbei wird unterschieden in Incident Response Tasks, Kommunikation und Entscheidungen. Der Spielleiter verteilt dann ausgehend von den definierten Aktionen der Spieler IOC (Indicators of Compromise) Karten und Inject Karten (externe Einflüsse). Dieser Rundenzyklus wird fortgeführt bis zum Ende der Übung (z.B. bis zur Wiederherstellung der Arbeitsfähigkeit des Unternehmens). Die Ergebnisse können anschließend in betriebliche Prozesse und Dokumentation einfließen.

Beobachtungen und Analysen der Spielergebnisse zeigen interessante Phänomene auf. Im Verlauf der Spielrunden werden immer wieder kritische Fragestellungen identifiziert, die entweder noch nicht oder nur unzureichend definiert waren. Zum Beispiel: Wann sollte die Kommunikation einer Schadsoftware mit ihrem Command and Control Server unterbunden werden? Wann kann man sicher sein, dass die Ransomware erfolgreich bekämpft wurde und die gesamte Infrastruktur frei von Ransomware ist? Es wird beobachtet, dass gemischte Teams, die den Gesamtüberblick haben, eher nach einem schnellen Weg zur "Recovery" suchen, während technische Teams eher auf "Identification" und "Containment" fokussiert sind. Weitere Beobachtungen zeigen, dass das Spiel die Transparenz von Anforderungen und Abläufen bei der Reaktion auf Sicherheitsvorfälle durch das Zusammenwirken einzelner Verantwortlichkeiten im Unternehmen erhöht.

Das Serious Game dient als Werkzeug, um gemeinschaftlich angepasste Aufgaben, Kommunikation und Entscheidungen im Rahmen der Incident Response für das eigene Unternehmen zu definieren. Die Ergebnisse des Spiels sind rollenbasierte, dokumentierte Prozesse zur Reaktion auf konkrete Szenarien im Bereich von Informationssicherheitsvorfällen.

Dieses Spiel ist geeignet, Systemlandschaften mit IT und OT zu analysieren und mit eher technischen oder gemischten Teams das Vorgehen während eines Ransomwarevorfalls zu proben. Eine Drohne könnte

in Zukunft Teil einer solchen Infrastruktur sein oder die Informationssysteme, die für Visual Computing notwendig sind, hier abbilden.

Die Erfahrungen aus den ersten Spieldurchführungen zeigen, dass eher Augenmerk auf „Identification“ von Ransomware und den betroffenen Systemen gelegt wird als auf Recovery – also die Wiederherstellung von Arbeits- oder Lieferfähigkeit. Die Erfahrungen zeigen auch, wie unterschiedlich Erwartungen an das Vorgehen und wie unterschiedlich Pläne sein müssen, wenn es um IT oder OT geht. „Philosophische Fragen“ wie abschalten oder abwarten, können tentativ im Serious Game entschieden werden, um die Incident Response zu unterstützen.

## 5 Diskussion

Schutz und Zuverlässigkeit und ist ein zentrales Thema für die Innovationen in der Angewandten Informatik wie der Visualisierung. Ein Incident kann passieren und dann muss der Weg zurück zu einem regulären Betrieb vorbereitet und geplant sein. Die Serious Games „Eine Frage der Sicherheit“ und „Operation Raven“ zeigen eine Möglichkeit auf, sich durch tentatives Handeln auf den Ernstfall vorzubereiten.

Das Forschungsprojekt ist noch nicht zu Ende und so freuen wir uns vom Institut für Schutz und Zuverlässigkeit für die Resilienz der Forschung zur Datenvisualisierung und andere Kolleginnen und Kollegen mit ihren Gruppen zu einem Spiel einladen zu dürfen. Mehr Spiele mit Spielerinnen und Spielern die freundliches, qualifiziertes Feedback geben – das sind die nächsten Schritte in unserer Forschung und für uns alle wichtig.

## Acknowledgments

Die Forschung im Projekt CONTAIN wird von BMBF (FKNZ 13N16581-13N16587) gefördert.

## Literatur/Quellen

*Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. MIS quarterly, 75-105.111946.*

*Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2023. Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 202. bsi.bund.de.*



Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2024.  
IT-Grundsicherheits-Profil für den Betrieb von  
UAS Band 1: UAS-Betriebskategorie "Open"  
(Offen).

[https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundsicherheits/Hilfsmittel/Profile/Profil\\_Drohnenprofil.html](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundsicherheits/Hilfsmittel/Profile/Profil_Drohnenprofil.html)

Huang, X., Chen, K., Tang, D., Liu, C., Ren, L., Sun, Z., ...  
& Mayer, H. (2023). Urban Building  
Classification (UBC) V2-A Benchmark for  
Global Building Detection and Fine-grained  
Classification from Satellite Imagery. *IEEE  
Transactions on Geoscience and Remote  
Sensing*.

Greiner, M., Strussenberg, J., Seiler, A., Hofbauer, S.,  
Schuster, M., Stano, D., ... & Lechner, U. (2024,  
May). Scared? Prepared? Toward a  
Ransomware Incident Response Scenario.  
In *International Conference on Innovations for  
Community Services* (pp. 289-320). Cham:  
Springer Nature Switzerland.

Seiler, A., Lechner, U., Strussenberg, J., & Hofbauer, S.  
(2024, May). Operation Raven: Design of a  
Cyber Security Incident Response Game.  
In *International Conference on Innovations for  
Community Services* (pp. 337-347). Cham:  
Springer Nature Switzerland.

Tampubolon, W., Reinhardt, W., & Behr, F. J. (2020). Very  
high resolution satellite imagery utilization  
standard for large scale topographic mapping.  
In *Seminar Nasional Geomatika*. Bogor: Badan  
Informasi Geospasial (pp. 939-46).

Wang, Y., Huang, H., Cabalo, C., Körner, M., & Mayer, H.  
(2023, July). Fully Automatic Generation of  
Training Data for Building Detection and  
Classification from Remote Sensing Imagery. In  
*IGARSS 2023-2023 IEEE International  
Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp.  
5563-5566). IEEE.

Zhao, T., Gasiba, T., Lechner, U., & Pinto-Albuquerque,  
M. (2024). Thriving in the era of hybrid work:  
raising cybersecurity awareness using serious  
games in industry trainings. *Journal of Systems  
and Software*, 210,

**Anschrift der Verfasser:**

Univ.-Prof. Dr. Ulrike Lechner

Judith Strußenberg, M.A.

Andreas Seiler, MSc

Maximilian Greiner, MSc

Dr. Stefan Hofbauer

Dr. Steffi Rudel

Institut für Schutz und Zuverlässigkeit

Universität der Bundeswehr München

Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Ulrike.Lechner@unibw.de



# Using semantic segmentation for 3D reconstruction and vice-versa

## Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Interpretation von Fassaden aus Bildern und der Nutzung dieser Informationen für die 3D-Rekonstruktion sowie der Verwendung der aus einem 3D-Rekonstruktionsmodell generierten Tiefenkarten zur Verfeinerung der Segmentierung. Diese Arbeit habe ich während meiner Promotion an der Universität der Bundeswehr München mit Hilfe meines Betreuers Prof. Helmut Mayer durchgeführt. In diesem Projekt kooperieren wir mit der Technischen Universität Berlin. Mit der Unterstützung von Mayer habe ich mehrere Merkmalsextraktoren entwickelt und Deep Learning mit traditionellen Lernmethoden kombiniert, um einen hybriden Ansatz zur hochpräzisen Abgrenzung von Fassaden zu entwickeln. Einige dieser Methoden waren und sind immer noch der Stand der Technik für bestimmte Benchmarks.

## Summary

This work focuses on façade interpretation from images and using this information for 3D reconstruction. Additionally, it employs depth maps generated from a 3D reconstruction model to refine segmentation. This research was conducted during my PhD studies at Bundeswehr University Munich under the supervision of Prof. Helmut Mayer. In collaboration with the Technical University Berlin, I developed several feature extractors and combined deep learning with traditional learning methods to create a hybrid approach for high-precision delineation of facades (Rahmani et al., 2018, 2019, 2022; Rahmani, 2020). Some of these methods remain state-of-the-art for specific benchmarks.

## 1 Introduction

Façade interpretation provides the most detailed information about a building's façade by labeling each pixel with a class label, such as window, door, wall, roof, balcony, and other predefined categories. By knowing which class each pixel belongs to, we can accurately recognize the shape and borders of each façade object.

Nowadays, 2D information alone is not sufficient. Visualization and 3D reconstruction of buildings are crucial for city understanding and planning. The 3D reconstruction of buildings, enhanced by semantic segmentation, not only improves the quality of the models but also reduces production time. Semantic segmentation can also help track changes by detecting differences between images taken at different times.

Two of the most profitable entertainment industries, games and movies, rely heavily on urban modeling for creating realistic environments. Initial work on façade segmentation focused primarily on window detection and 3D reconstruction from images (Mayer et al., 2006; Reznik et al., 2008). These early methods were later extended by using extracted

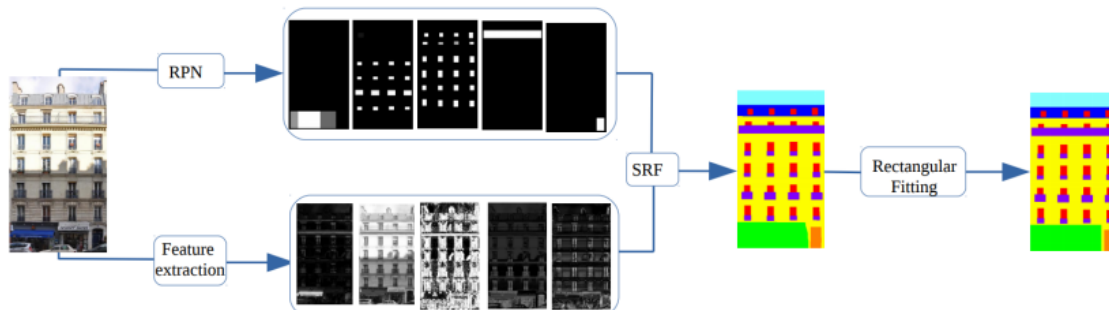
features (Cohen et al., 2014; Jampani et al., 2015; Martinovic et al., 2012). We expanded on these features, filtered them, and integrated them into Structured Random Forests (Kontschieder et al., 2011a, 2011b). Additionally, we advanced our research by incorporating deep learning into our model selection approach, developing features that capture both the global and local arrangement of objects on the façade surface.

We introduced region proposal features for Structured Random Forests and evaluated their effects. Another significant extension of façade segmentation was aimed at achieving higher delineation and segmentation of façade windows. We developed a new system for window delineation by labeling each window pixel with classes such as transoms/mullions, glass, and wall. This approach allowed for more precise identification and segmentation of windows, enhancing the overall quality of façade interpretation.

Overall, our research contributes to the field by combining traditional feature extraction methods with advanced deep learning techniques, resulting in a robust and efficient approach for detailed façade interpretation and 3D reconstruction.

## 2 Semantic segmentations of façade images

Our façade segmentation system comprises several components: a feature extractor, regional proposal



**Figure 1:** Architecture of the proposed pipeline for façade segmentation (RPN- Regional Proposal Network, SRF- Structured Random Forest).

### 2.1 Structured Random Forest

Structured Random Forests (SRFs), introduced by Kotschieder (2011a, 2011b), serve as the main segmentation algorithm in our system. Unlike traditional decision trees and random forests, which output a class label for each pixel, SRFs output a patch for the corresponding pixel. This patch-based output helps create a more accurate segmentation by modeling the local neighborhood.

Due to the patch-based output for each pixel, additional complexity arises, necessitating post-processing and a voting system to determine the final pixel label. For training the SRFs, we employed the extremely randomized tree training methodology.

### 2.2 Feature extraction

Initially, we employed a variety of feature extractors, including Local Binary Patterns, TextonBoost filter responses, RGB, CIE Lab, grayscale channels, and Histogram of Oriented Gradients. Additionally, we incorporated traditional object detectors. Beyond these, we computed global features such as the standard deviation and median of each row and column, as well as the difference between the median and the corresponding pixel value. We also included the vertical position of each pixel relative to the image width. In the first version of our system, we utilized over 80 features.

After careful analysis, we removed several features, such as Local Binary Patterns, which exhibited low information gain. This refinement was critical because we used the Extremely Random Forest

features, Structured Random Forests, an iterative optimization technique, and a rectangular fitting method. This system is designed as a pipeline architecture (Figure 1).

training technique, and removing low-information features allowed higher-probability selection of better features.

Furthermore, in the next iteration, we replaced the traditional object detector with new deep learning-based algorithms, which offered significantly improved accuracy. This enhancement was essential for achieving better performance in our segmentation tasks. Consequently, the final version of our SRF system used fewer than 65 features.

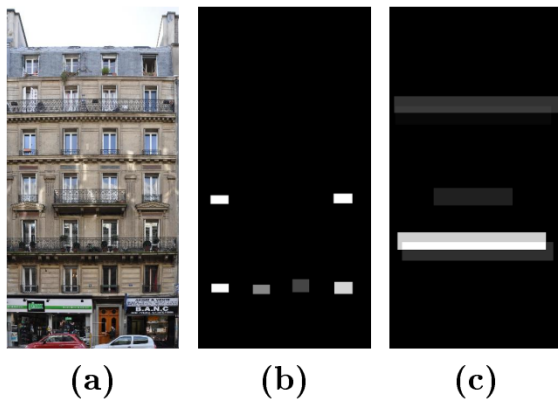
This iterative refinement process was vital in enhancing the efficiency and accuracy of our segmentation algorithm. By systematically evaluating and optimizing our feature set, we ensured that the most informative features were prioritized, leading to superior segmentation results.

### 2.3 Regional Proposal Network

It has been demonstrated in various applications that deep learning detectors achieve impressive results. We evaluated Single Shot Detectors (Liu et al., 2016) and Faster R-CNN (Ren et al., 2015) architectures, finding that their accuracies do not differ significantly. Our object detection focused on identifying balconies, running balconies, doors, shops, and windows.

To enhance the detection accuracy, we divided the balcony class into two separate categories: short balconies and long balconies. The latter refers to balconies that span more than half the width of the building (Figure 2). Additionally, we made modifications to the door object class. During training, we added an additional wall padding to distinguish between building entrance doors and shop entrances.

For each detected object, we created a separate feature, mapping the probability values from [0-1.0] to [0-255]. This approach allowed us to utilize the detection probabilities effectively, contributing to more precise and reliable segmentation outcomes.



**Figure 2:** Object detector for the balcony and running balcony classes.

## 2.4 Rectangular fitting

After the final output of the SRF, the objects do not yet have regular shapes. Since façade objects typically have a rectangular shape, the final step involves an optimization technique described in Kotschieder et al. (2011b). This technique initially attempts to match the SRF outputs with shapes observed during training, which are stored in the leaf nodes of the SRF. This initial optimization helps to reduce noise and improve segmentation accuracy.

Following this, we perform a rectangular fitting optimization to transform all façade objects into rectangular shapes. This final step ensures that the segmented objects conform to the expected geometric properties of façade elements, resulting in cleaner and more accurate segmentation outputs.

## 2.5 Datasets

For algorithm evaluation, we used two datasets: the ECP dataset (Teboul et al., 2011) and the Graz Dataset (Riemenschneider et al., 2012). Additionally, we applied the algorithm to produce annotations for our acquired data used for 3D reconstruction, although we do not report results on this latter dataset.

The ECP dataset consists of 104 rectified façade images from the city of Paris, featuring Haussmannian architecture. All images are labeled with one of seven labels: balcony, door, roof, shop, wall, window, and sky. This dataset was initially published in 2011, with improved annotations provided by Martinovic et al. in 2012.

The Graz dataset comprises 50 rectified images from the city of Graz, representing various architectural styles such as Classicism, Biedermeier, Historicism, and Art Nouveau. The Graz dataset includes four classes: door, window, sky, and wall.

Due to the limited number of images in the Graz dataset, we employed a 5-fold cross-validation technique to train and validate the algorithm. This approach ensured robust evaluation despite the smaller dataset size.

## 2.6 Evaluation

We evaluated the system based on the following technical settings. The SRF was configured with 16 trees, as increasing the number beyond 16 did not yield improved results. We tested various patch sizes ranging from 11x11 to 21x21 pixels, with the best performance achieved using a patch size of 17x17 pixels.

At each node, several splitting functions were employed. We randomly evaluated 100-300 configurations at each node, consisting of one to three features. Among the features tested, the most effective were the Region Proposal Network (RPN) features, vertical position, the difference between the median value of the RGB channels and the corresponding RGB value, and the Histogram of Oriented Gradients (HOG).

The final results, presented in Figure 3, illustrate the improvements achieved at each step of the process.

## 3 Integration of the depth features in SRF

In our work, we aimed to test the hypothesis: Is there a positive effect on SRF accuracy if we include depth maps generated from 3D reconstruction as a feature?

Initially, the 3D reconstruction pipeline rectified the façade images and generated their corresponding depth maps. However, these depth maps were not entirely accurate and contained noise. Compared to the RPN features, the depth maps carried less information and did not provide any additional useful data.

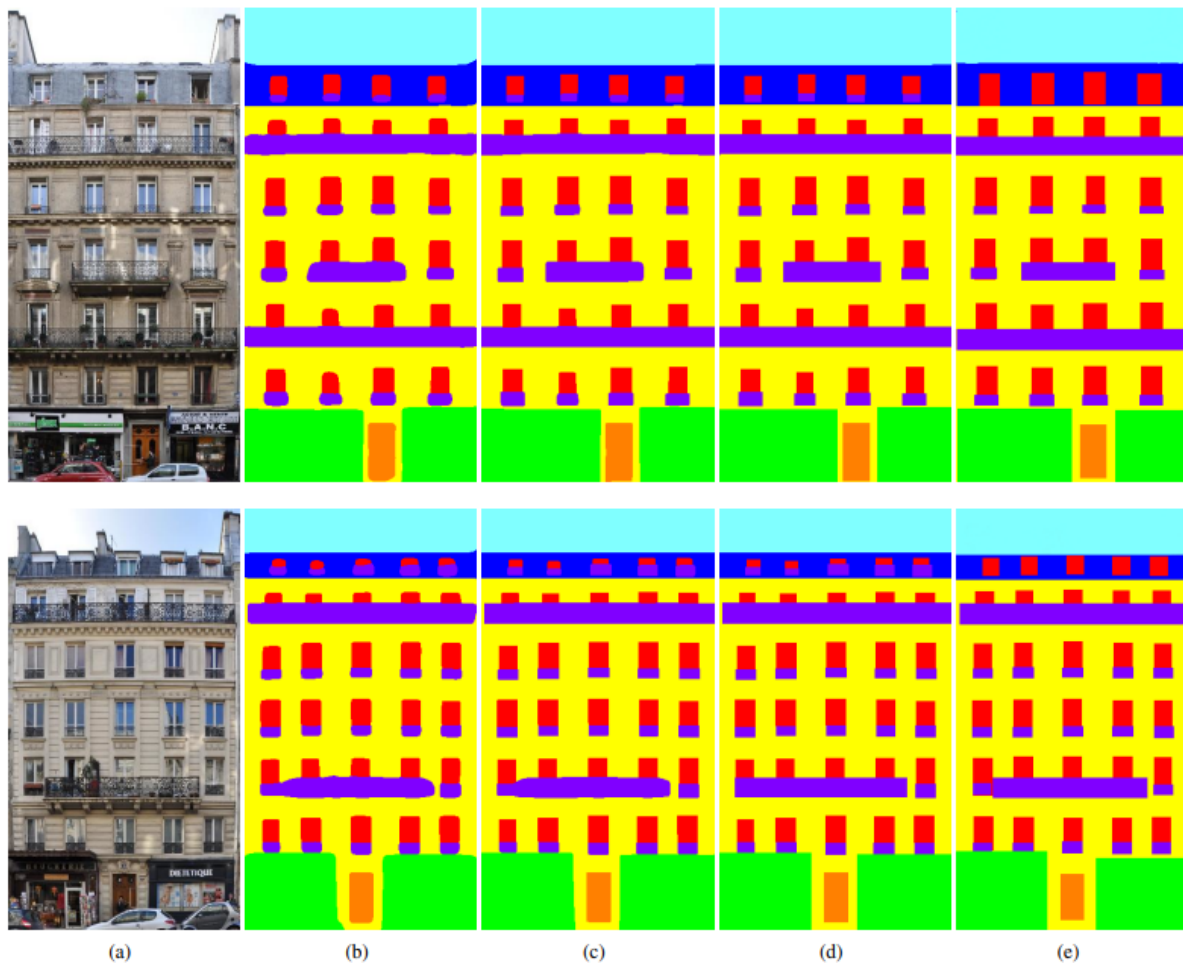
We conducted two types of evaluations of the SRF. The first evaluation assessed the effect of depth maps in the absence of RPN features, while the second evaluation considered the presence of RPN features.

In the first setting, the inclusion of depth maps improved the model's accuracy from 87.13% to 88.4%. In the second setting, the accuracy increased

marginally from 91.18% to 91.21%, resulting in only a 0.03% improvement.

These results empirically demonstrated that depth maps do not significantly enhance the model's

performance when other features, such as RPN, already capture most of the information encoded in the depth maps. Additionally, the presence of noise in the depth maps further limited their effectiveness.



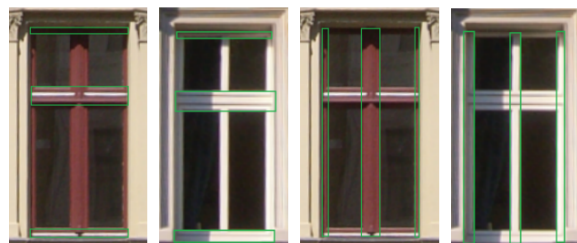
**Figure 3:** Qualitative results on the ECP dataset of the SRF after feature cleaning. Column (a) input images, (b) result from structured Random Forest with Regional Proposal Features, (c) results after 19 iterations of optimization, (d) results after Rectangular Fitting, (e) ground truth. Object classes: red color- windows, brown- door, purple- balcony, cyan- sky, yellow- wall, green-shops, blue-roof.

#### 4 Window refinement

This work is one of the pioneering efforts addressing the window refinement problem. For achieving higher delineation of the building model, it is crucial to understand the subparts of façade objects. Therefore, we introduced a novel approach to window refinement by further segmenting windows into parts such as transoms and mullions, glass, and wall (Figure 4).

The window refinement process comprises several components: an object detector network, a semantic segmentation architecture, a grid assumption clustering algorithm, and two optimization algorithms. These algorithms are used for precise

frame position determination and for accurately determining the width and height of the transoms and mullions.

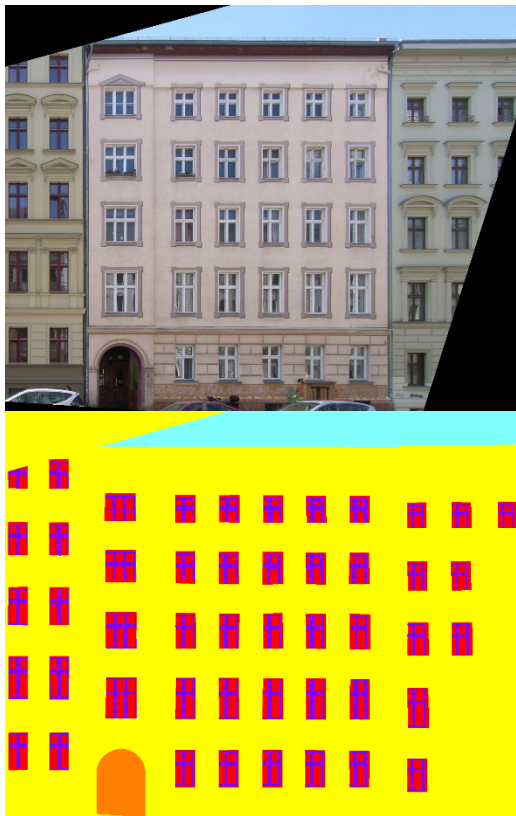


**Figure 4:** Horizontal and vertical bars of the windows. In the first two images are shown the horizontal bars known as transoms, on the right side on the last two images are presented the vertical bars known as mullions.

#### 4.1 Windows refinement dataset

Since no existing dataset addresses our specific problem, we began by creating a new dataset. The existing datasets for façade segmentation have very low resolution, making it necessary to start from scratch, involving data acquisition, data annotation, and annotation verification.

For this purpose, we used 50 rectified façade images containing 1,478 windows, and for training, we used four images containing 164 windows. The resolution of these façade images exceeds 1500x1500 pixels. The images were taken from large and small German cities, including Munich, Berlin, and Mühldorf am Inn. The images were rectified using the method by Ley et al. (2016) and manually annotated using the LabelMe annotation tool (Torralba et al., 2010) (Figure 5).



**Figure 5:** Sample of the window refinement dataset. The upper image, the rectified façade image, the bottom image the annotated image.

#### 4.2 Windows network architectures

We evaluated two object detection architectures: Single Shot Detector and Faster R-CNN. Both architectures produced similar results, successfully detecting all the windows in the test dataset.

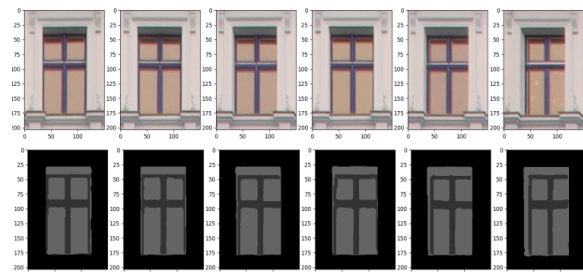
All detected windows were cropped with a small padding added. These cropped objects were then inputted into the semantic segmentation network. For this component of the complete system, we used a pre-trained Pyramid Scene Parsing Network (Zhao et al., 2017) architecture, retrained to handle our specific task.

#### 4.3 Horizontal and vertical clustering

In most cases, windows are arranged in a grid pattern. We leveraged this heuristic to develop a clustering method that refines the segmentation produced by the semantic segmentation network. Additionally, we considered that the images are taken from the ground, allowing us to account for the distribution of horizontal bars. Specifically, the bottom horizontal bar is not visible in the upper rows (stairs), and its width follows a linear increase based on the vertical position in the image. This pattern is evident in Figure 4, where the bottom transom is absent on the top floor and has the largest height on the bottom floor. A similar arrangement applies to the mullions, whose visibility changes when viewed from left to right or vice versa, depending on the camera angle.

Since the façade images are rectified, we can use the grid assumption to place each image into two clusters: one vertical cluster and one horizontal cluster. Windows in the same column are assigned to the same vertical cluster, while windows in the same row are assigned to the same horizontal cluster.

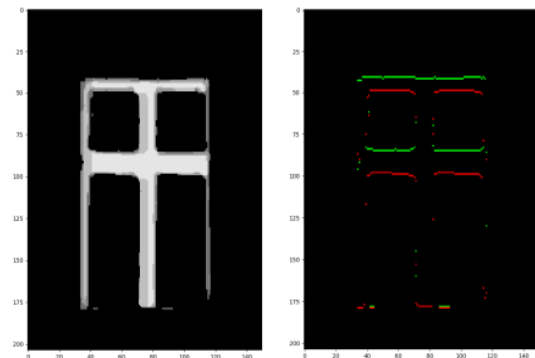
Each vertical cluster determines the mullions of the windows within that cluster, with each window voting for the position of the mullions in that column. Similarly, the horizontal clusters determine the transoms, with each window voting for the transom positions in that row (Figure 6). To ensure consistent processing, we added additional padding to each window so that each window patch has dimensions of 250x150 pixels.



**Figure 6:** Windows that are assigned to a same horizontal cluster. Top: Images of the cropped windows, bottom: output of the Semantic segmentation network.

In the same way that we determine the positions of the transoms and mullions, each window also votes for the frame borders. To compute the positions of the transoms and mullions, we sum all the segmentation masks within the same cluster and then compute the gradient of the resulting image. The row or column with the highest transition between wall/window and transom/mullion becomes the starting position of the transom or mullion. Similarly, we compute the end position by summing the gradients in each row or column, identifying the highest transition points (Figure 7). We apply the same approach to compute the frame borders.

Each window within the same vertical cluster has the same mullion width and the same vertical starting and ending positions of the frame. Similarly, each window within the same horizontal cluster has the same horizontal starting and ending positions, as well as the transom positions.



**Figure 7:** The image on the left shows the voting results for each image from Figure 6, where brighter pixels indicate a higher number of votes. The image on the right presents the first gradient of the left image. In this gradient image, green pixels represent the transition from wall/glass to transom, marking the starting position of a transom, while red pixels represent the transition from transom to glass/wall.

In the final phase, we refine the individual windows based on the segmentation network to account for possible rectification errors, obstacles on the windows, or other external factors that may have affected the transoms and mullions. We adjust the starting position or thickness of a transom or mullion if there is strong statistical evidence to support the change.

The complete pipeline and architecture of the window refinement process are shown in Figure 8.

## 5 Discussion

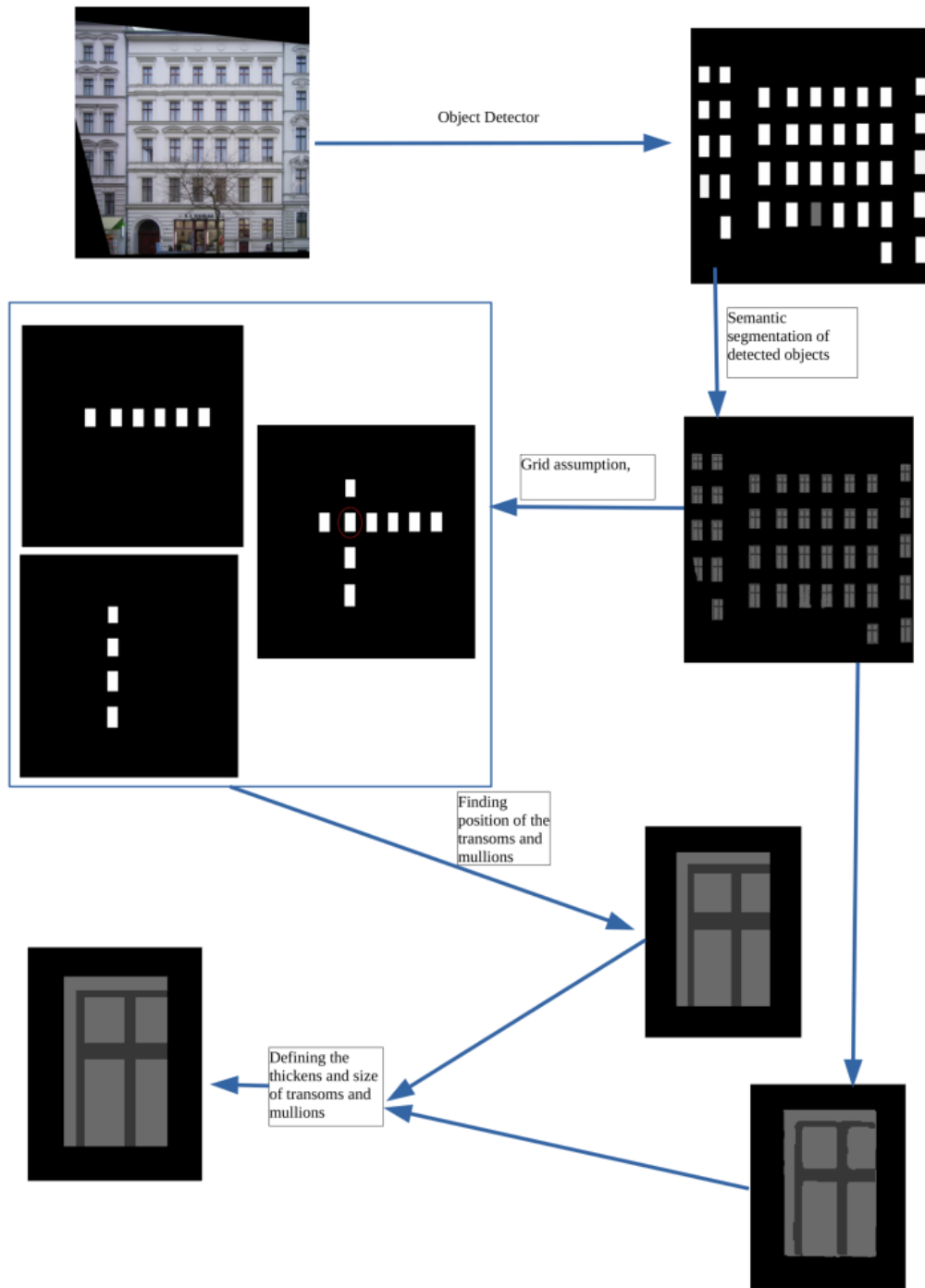
The presented approach for semantic segmentation of façade images and their delineation, aimed at enhancing 3D reconstruction, shows significant promise in improving the understanding of façade images and their window components with high accuracy. The use of Structured Random Forests (SRF) combined with fine-tuned features has demonstrated the ability to achieve state-of-the-art results, especially when tested on smaller datasets like the Graz Dataset.

Moreover, this work has pioneered the window delineation problem, creating an initial dataset and yielding promising results that can be further refined and expanded. In collaboration with our project partners, we successfully integrated the semantic segmentation masks into the 3D reconstruction process, resulting in improved reconstruction outcomes.

## References

- Cohen, A., Schwing, A. G. and Pollefeys, M., [2014]: *Efficient structured parsing of facades using dynamic programming*. In: *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3206–3213.
- Jampani, V., Gadede, R. and Gehler, P. V., [2015]: *Efficient facade segmentation using auto-context*. In: *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*, pp. 1038–1045.
- Kontschieder, P., Bulo, S. R., Bischof, H. and Pelillo, M., [2011a]: *Structured class-labels in random forests for semantic image labelling*. In: *International Conference on Computer Vision*, pp. 2190–2197.
- Kontschieder, P., Bulo, S. R., Donoser, M., Pelillo, M. and Bischof, H., [2011b]. *Semantic image labelling as a label puzzle game*. In: *British Machine Vision Conference*, pp. 1–12.
- Ley, A. and Hellwich, O., [2016]: *Depth map based façade abstraction from noisy multi-view stereo point clouds*. In *Pattern Recognition: 38th German Conference, GCPR 2016, Hannover, Germany, September 12–15, 2016, Proceedings 38*, pp. 155–165. Springer International Publishing.
- Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.Y. and Berg, A.C., [2016]. *Ssd: Single shot multibox detector*. In *Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11–14, 2016, Proceedings, Part I 14*, pp. 21–37. Springer International Publishing.





**Figure 8:** Architecture of the window refinement system.

Martinovic, A., Mathias, M., Weissenberg, J. and Van Gool, L., [2012]: *A three-layered approach to facade parsing*. In: *European Conference on Computer Vision*, pp. 416–429

Mayer, H. and REZNIK, S., [2006]: *MCMC Linked with Implicit Shape Models and Plane Sweeping for 3D Building Facade Interpretation in Image Sequences*. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. (36) 3, pp. 130–135.

Riemenschneider, H., Krispel, U., Thaller, W., Donoser, M., Havemann, S., Fellner, D. and Bischof, H., [2012]: *Irregular lattices for complex shape grammar facade parsing*. In: *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1640–1647.

Rahmani, K., Huang, H. and Mayer, H., [2017]. *Facade segmentation with a structured random forest*. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*

Rahmani, K., and Mayer H., [2018]: *High quality facade segmentation based on structured random forest, region proposal network and rectangular fitting*. *ISPRS Annals*

*of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 4 (2018): pp. 223–230.*

*Rahmani, K., [2020]: Facade Interpretation from Images (Doctoral dissertation, Dissertation, Neubiberg, Universität der Bundeswehr München, 2020).*

*Rahmani, K., and Mayer, H., [2022]: "A Hybrid Method for Window Detection on High Resolution Facade Images." International Conference on Intelligent Systems and Pattern Recognition. Cham: Springer International Publishing, 2022.*

*Reznik, S. and Mayer, H., [2008]: Implicit Shape Models, Self Diagnosis, and Model Selection for 3D Facade Interpretation. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 3/08, pp. 187–196.*

*Ren, S., He, K., Girshick, R. and Sun, J., [2015]: Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. Advances in neural information processing systems, 28.*

*Teboul, O., Kokkinos, I., Simon, L., Koutsourakis, P. and Paragios, N., [2011]: Shape grammar parsing via reinforcement learning. In: Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 2273–2280.*

*Torralba A, Russell B. C., Yuen J., [2010]: LabelMe: Online image annotation and applications. Proceedings of the IEEE. 2010 Jun 10;98(8): pp.1467–1484.*

*Zhao, H., Shi, J., Qi, X., Wang, X. and Jia, J., [2017]: Pyramid scene parsing network. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 2881–2890.*

**Adress of the Author:**

Dr. rer. nat. Kujtim Rahmani  
Senior Computer Vision Algorithm Engineer  
Blagoja Ilievski Gune 15  
1300 Kumanovo  
kujtim.rahmani@gmail.com

Sergej Reznik

# Erinnerungen an meine Zusammenarbeit mit Helmut Mayer und das Projekt "Abstraktion von Geoinformation für die multiskalige Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung"

## Zusammenfassung

Helmut Mayer und Sergej Reznik kennen sich seit 2002 und haben von 2003 bis 2008 eng zusammengearbeitet, u. a. im Bündelprojekt "Abstraktion von Geoinformation für die multiskalige Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung". Sergej Reznik berichtet von den Aufnahmekampagnen dieses Projekts und was er als Mitarbeiter von Helmut Mayer von diesem gelernt hat.

## 1 Einleitung

Von 2002 bis 2008 war ich wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl von Helmut Mayer. 16 Jahre später hat Hai Huang mich angeschrieben, ob ich mich an der Festschrift anlässlich des 60. Geburtstags von Helmut Mayer mit einem Beitrag beteiligen kann und möchte. Natürlich erinnere ich mich gerne an diese Zeit zurück und werde versuchen, unsere gemeinsame Arbeit zu beschreiben.

Darüber hinaus ist dies ein guter Grund, mich an die Zeit zu erinnern, in der ich wunderbare Menschen kennengelernt habe, die die Blüte der deutschen Wissenschaft darstellen.

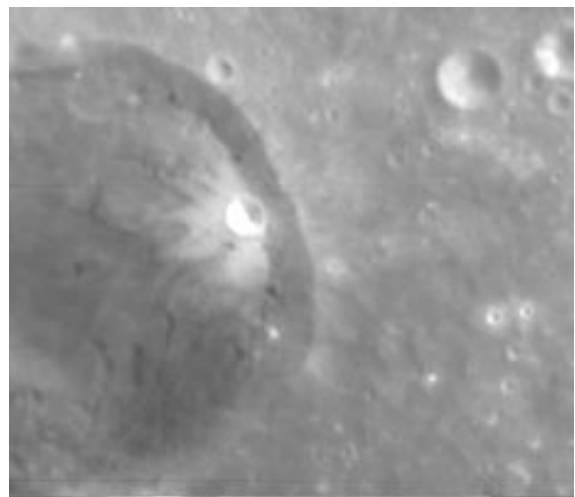
## 2 Phase I: 2002

Die stärkste Zusammenarbeit mit Helmut Mayer betrifft dabei das Projekt Bündelprojekt "Abstraktion von Geoinformation für die multiskalige Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung". Vor meiner Teilnahme an diesem Projekt war ich als wissenschaftliche Hilfskraft im Projekt „Mars Express“ des DLR tätig.

Seitdem ist viel Zeit vergangen. Ich werde jedoch versuchen, die wichtigsten Meilensteine meiner Zusammenarbeit mit Helmut Mayer zu beschreiben und dann kurz darauf einzugehen, wie ich das während dieser Zusammenarbeit gewonnene Wissen in die Praxis umgesetzt habe.

Helmut Mayer und ich haben uns 2002 kennengelernt.

Alexey Ostrowsky (ein Mitarbeiter von Helmut Mayer) hat mich als wissenschaftliche Hilfskraft im Projekt „Mars Express“ vorgeschlagen. Er entwickelte die Methode „Shape from Shading“ zur Rekonstruktion von 3D-Reliefs aus Mars-Express Satellitenbildern.



## 3 Phase II: 2003 – 2008

Im Jahr 2003 förderte die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) das Projekt „Multiskalige Interpretation von Fassaden aus Luftbildern, terrestrischen Bildern und Laserscannerdaten zur prototypenbasierten Visualisierung“.

Professor Mayer hat mich eingeladen, an diesem Projekt teilzunehmen. Dieses Angebot habe ich gerne angenommen. Von 1.1.2003 bis 31.12.2007

habe ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr München in Neubiberg gearbeitet.



In dieser Zeit hatte ich das Glück, wunderbare Menschen kennenzulernen, die eine Spitze der deutschen Wissenschaft und Kultur repräsentieren.

Jetzt fällt es mir schwer, mich an alle Namen zu erinnern, aber ich habe die wärmsten Erinnerungen an diese Menschen, an Treffen und Konferenzen bewahrt.



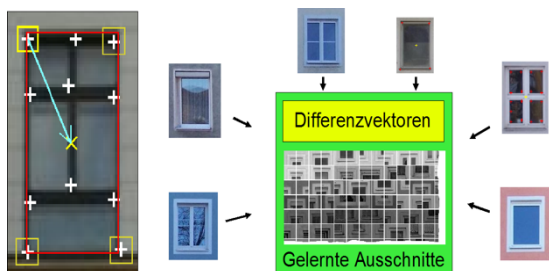
#### 4 Fazit der Zusammenarbeit

Zusammenfassend flossen unter der Anleitung von Prof. Mayer Forschungsergebnisse des o.g. Projekts in meine Dissertation mit dem Titel „Aussehensbasierte und generative multiskalige Interpretation von Fassaden in terrestrischen Bildsequenzen“ ein.

Diese Arbeit stellt einen Ansatz vor, mit dem für Fassaden in terrestrischen Bildsequenzen, auf denen einzelne Fenster unterscheidbar sind, - d.h. die keine reinen Glasfassaden sind -, die Fenster erkannt, ihr Umriss bestimmt, diese in Zeilen und Spalten angeordnet und dreidimensional rekonstruiert werden können. Aussehensbasierte Modellierung in Form von Implicit Shape Models (ISM) wird zusammen mit Markov Chain Monte Carlo (MCMC) - Verfahren kohärent sowohl für die Detektion als auch für die Umrissbestimmung der Fenster verwendet. Die Fenster werden validiert und eine Modellselektion basierend auf Akaike's Information Criterion (AIC) wird zur Auswahl zwischen Einzelfenstern und aus diesen gebildeten Fensterzeilen bzw. -spalten verwendet. Dies erhält das allgemeine Aussehen der Fassade ohne die Notwendigkeit jedes Objekt getrennt zu beschreiben, was Ressourcen spart und die Effizienz der Visualisierung erhöht. Für eine 3D Interpretation der Fassade wird Plane Sweeping genutzt.

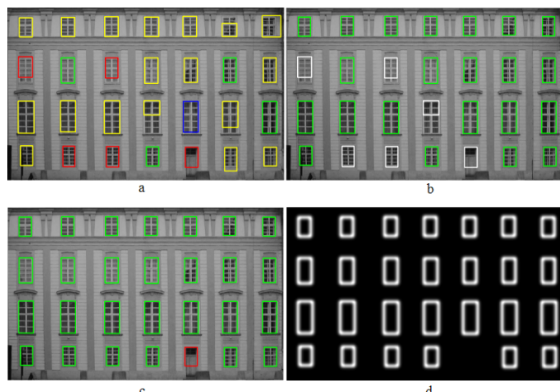
Im Folgenden stelle ich einige wichtige Teile unserer Forschung vor:

#### Fensterdetektion mittels Implicit Shape Models:



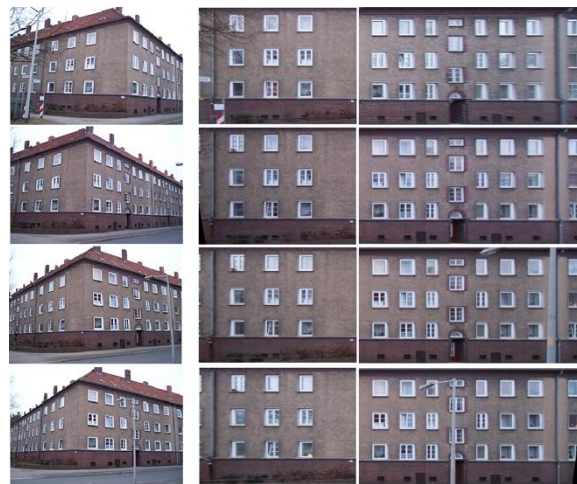
Fenster mit manuell markiertem Umriss (rotes Rechteck, links), Förstnerpunkte (weiße Kreuze) und ein Differenzvektor eines Förstnerpunktes in der Nähe einer Fensterecke zur Fenstermitte (blauer Pfeil); Gelernte Differenzvektoren und Bildausschnitte um Förstnerpunkte (rechts) für eine Fenstermenge (Trainingsdatensatz).

#### Validierung der Objekte:



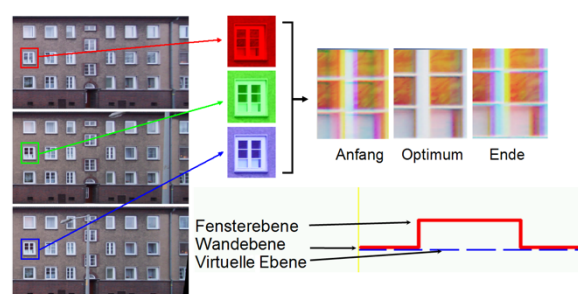
a) Validierung der Objekte: Grün – Sehr gut (Note 1), Blau – Gut (Note 2), Gelb – Befriedigend (Note 3), Rot – Ausreichend (Note 4); b) Ergebnis nach dem Vergleich der Objekte mit den Noten 2 und 3 mit den Hypothesen mit Note 1; c) Endgültiges Ergebnis; d) Umrissbild.

#### Generative aussehensbasierte Fassadeninterpretation:



links – Bildsequenz; rechts – automatisch orthogonale Fassadenbilder.

#### Planesweeping:



Planesweeping demonstriert an drei Bildern. Die Helligkeitswerte der drei Bilder wurden für eine gute Visualisierung den drei Farbkkanälen Rot, Grün und Blau zugeordnet. Unterschiede zeigen sich in Form von Farben.

#### 5 Praktische Anwendungen

Seit 2009 arbeite ich bei der Firma TechnolasPV, die Laser für die Augen Chirurgie entwickelt.



The VICTUS Femtosecond Laser is a versatile platform with cataract, LASIK flap, and therapeutic indications. It features Swept Source (2S) OCT Technology for live, online, continuous viewing of the entire procedure for all procedures.

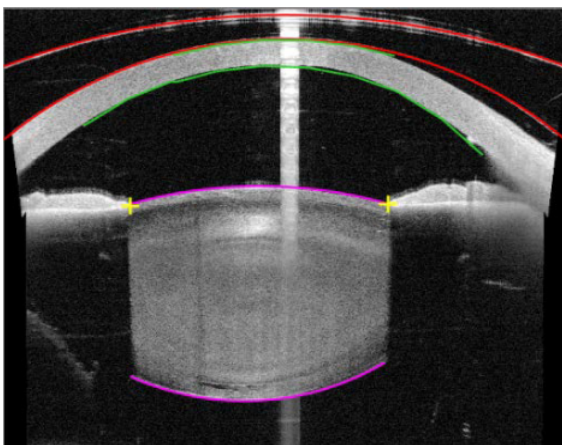
Dieses Gerät verfügt über integrierte Digitalkameras und OCT. Ich habe Methoden zur Erkennung und genauen Positionierung verschiedener Objekte in Bildern entwickelt.

Eine Methode wo die Erkennungen mit MCMC gelöst wurden:

OCT-Scan mit angedocktem Auge.

Ziele:

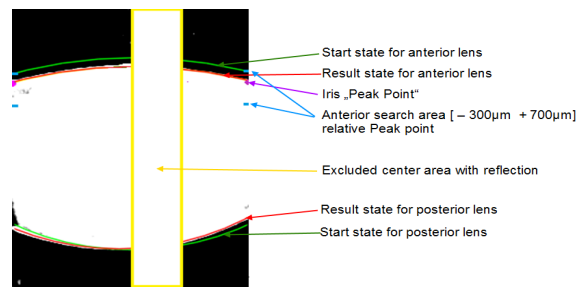
1. Erkennung der exakten Position der Patienten Interface mit einer Genauigkeit von  $\sim 10 \mu\text{m}$ .
2. Erkennung der Anterior und Posterior Arcs der Augenlinse mit einer Genauigkeit von  $0$  bis zu  $30 \mu\text{m}$ .



#### Recognition results.

- Red – Patient Interface (anterior and posterior).
- Magenta – Crystalline Lens (anterior and posterior)
- Green – Cornea (anterior and posterior)
- Yellow crosses – Iris Peak Points

#### Lens detection mittels MCMC results:



In diesem Beispiel beträgt der CCC für die Anterior Linse 0,94 und für die Posterior Linse 0,88. Diese Zustände wurden nach 141 Schritten für die vordere Linse und 15 Schritten für die hintere Linse erreicht.

Nun freue ich mich, ihn bei der Feier seines 60. Geburtstags wiederzusehen.

#### Literatur/Quellen

*Helmut Mayer, Sergiy Reznik: Building Facade Interpretation From Image Sequences (2005)*

*Sergej Reznik, Helmut Mayer: „Implicit Shape Models, Model Selection and Plane Sweeping for 3D Facade Interpretation“ (2007)*

*Sergej Reznik, Helmut Mayer: „Implicit Shape Models, Self-Diagnosis, and Model Selection for 3D Facade Interpretation“ (2008)*

*Sergej Reznik: Doktorarbeit „Aussehensbasierte und generative multiskalige Interpretation von Fassaden in terrestrischen Bildsequenzen“ (2009)*

#### Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Sergej Reznik  
Senior Specialist, Software Engineer, R&D  
Technolas Perfect Vision GmbH  
Messerschmittstr. 1+3  
80992 München, Germany  
Sergej.Reznik@bausch.com  
www.technolaspv.com

Michael Schmitt

# Photogrammetrie & Fernerkundung, Visual Computing und Erdbeobachtung – eine Disziplin im Wandel der Zeit

## Zusammenfassung

Seit Gründung der Universität der Bundeswehr München wird dort auch die wissenschaftliche Disziplin der Photogrammetrie & Fernerkundung in Forschung und Lehre vertreten – wenn auch heute nicht mehr unter diesem Namen. Mit einem Fokus auf Prof. Helmut Mayer, den letzten Inhaber einer Professur der klassischen Denomination und heutigem Vertreter des modernen Fachgebiets Visual Computing wird in diesem Beitrag die historische Entwicklung beleuchtet. Dabei wird festgestellt, dass die Themen der Photogrammetrie & Fernerkundung auch heute noch an der Universität vertreten werden, allerdings nicht mehr unter dem Dach der ursprünglichen „Heimat“ Geodäsie, sondern im Rahmen von Informatik und Luft- und Raumfahrttechnik.

## Summary

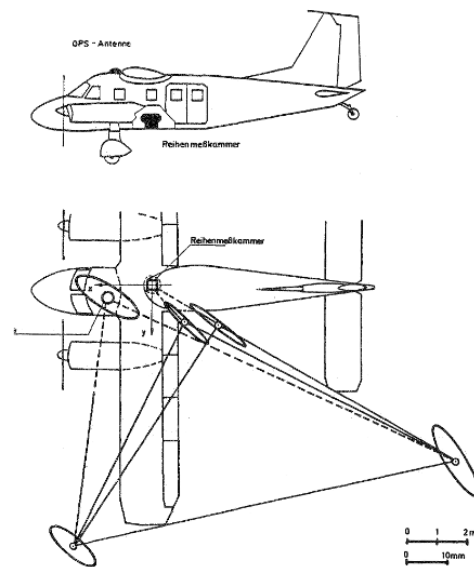
The scientific discipline of photogrammetry and remote sensing has been represented in research and teaching at the University of the Bundeswehr Munich since it was founded - even if it no longer goes by this name today. With a focus on Prof. Helmut Mayer, the last holder of a professorship in the classical denomination and today's representative of the modern field of visual computing, this article examines the historical development. It is noted that the topics of photogrammetry and remote sensing are still represented at the university today, albeit no longer under the umbrella of the original “home” of geodesy, but within the framework of computer science and aerospace engineering.

## 1 Einführung

Aufgrund des kürzlich gefeierten 50-jährigen Jubiläums ist aktuell wohlbekannt, dass die beiden Universitäten der Bundeswehr in München und Hamburg zum Herbstsemester 1973 ihren Lehr- und Forschungsbetrieb aufnahmen. Von Anfang an gab es an der Universität der Bundeswehr München (UniBw M) einen Studiengang des Vermessungswesens, der neben den Instituten für Geodäsie, für Liegenschaftswesen, Planung und Bodenordnung und für Astronomische und Physikalische Geodäsie auch vom Institut für Photogrammetrie und Kartographie ausgestaltet wurde (Brunner, 1994). Dieser Beitrag beleuchtet die historischen Entwicklungen seit den Gründungstagen der Universität bis zum heutigen Tage und bettet den Jubilar, Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer in diese Entwicklungen ein. Dadurch, dass Helmut Mayer in seiner Zeit als Ordinarius die größeren Umbrüche miterlebt und -gestaltet hat, kann er aus Sicht der Fachdisziplin als integrierendes Bindeglied von Vergangenheit und Zukunft, von Tradition und Moderne betrachtet werden.

## 2 Die Ursprünge

Als integraler Bestandteil des Vermessungswesen-Studiengangs gehörte das Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Fakultät für



**Abbildung 1:** Grafik aus einer Arbeit von Prof. Egon Dorrer zur GPS-unterstützten Aerotriangulation (Dorrer & Schwirtz, 1988) – ein perfektes Beispiel für klassische Photogrammetrie.

**Tabelle 1:** Neuordnung der alten Geodäsie-Professuren im Zuge der Studiengangsauflösung 2012.

Altes Institut	Professuren	Neue Institutszuordnung
Institut für Geodäsie	Allgemeine Geodäsie	-
	Ingenieurgeodäsie	-
Institut für Geoinformation und Landentwicklung	Landmanagement	Institut für Geodäsie (Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften)
	Geoinformatik	
Institut für Photogrammetrie und Kartographie	<b>Photogrammetrie und Fernerkundung → Visual Computing</b>	Institut für Angewandte Informatik (Fakultät für Informatik)
	Photogrammetrische Systeme und Fernerkundung	-
	Kartographie und Topographie	-
Institut für Erdmessung und Navigation	Erdmessung	Institut für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung (Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik)
	Navigation	

Bauingenieur- und Vermessungswesen zu den Gründungsinstituten der Universität der Bundeswehr München. Innerhalb dieses Instituts übernahm Univ.-Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer ab 1974 die Professur für Photogrammetrie als Gründungsprofessor. Wie sich später noch zeigen wird, war Egon Dorrer als Schüler von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ernst Gotthardt der erste UniBw-Professor, der seine wissenschaftliche Ausbildung am später aufgelösten Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität (damals noch: Hochschule) München (TUM) genossen hatte (Stilla, 2009). Inhaltlich beschäftigte sich Prof. Dorrer unter anderem mit der Entwicklung operationeller Techniken in der Nahbereichsphotogrammetrie, der Aerotriangulation und Blockausgleichung unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit kinematischer GPS-Beobachtungen (vgl. Abbildung 1) und der Auswertung von Satellitenbilddaten zur Darstellung der Marsoberfläche in Karten – also der klassischen Photogrammetrie, die sich vor allem durch ein fundiertes Verständnis der optischen Abbildungsgeometrie und die algebraische bzw. numerische Lösung großer Gleichungssysteme auszeichnet. Eine technisch besonders spannende Entwicklung in der Zeit Egon Dorrers war sicher die Einführung der digitalen Photogrammetrie und entsprechender Arbeitsstationen und Programmier-sprachen.

Den Studierenden des Vermessungswesens wurde im Rahmen zahlreicher Lehrveranstaltungen, vor allem Photogrammetrie I bis V, eine fundierte Kenntnis dieser klassischen, stark mathematisch orientierten Photogrammetrie vermittelt – auch unter Zuhilfenahme von Mess-, Rechen- und Programmierübungen (Brunner & Dorrer, 1994).

Im Jahr 1982 wurde das Institut um die neu gegründete Professur für Photogrammetrische Systeme und Fernerkundung, vertreten durch Univ.-Prof. Dr.-Ing. Friedrich S. Kröll, ergänzt. Bis

zu Prof. Krölls Emeritierung im Jahre 2005 vervollständigte die Professur das Portfolio des Instituts insbesondere in der Lehre durch Lehrveranstaltungen zur Fernerkundung, zur Bildinterpretation oder zur graphischen Datenverarbeitung, während der Schwerpunkt in der Forschung auf der Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Unterstützung des Menschen in Mensch-Maschine-Systemen lag (Brunner & Dorrer, 1994).

### 3 Der Umbruch

Zwischen 1973 und 1998 haben insgesamt 626 Studierende ein Studium des Vermessungswesens an der UniBw M aufgenommen, was einem Durchschnitt von 24 Studienanfängern pro Jahr entspricht (Dorrer, 2001) – keine großen Zahlen, aber auch nicht ganz ungewöhnlich für das relativ kleine Fach Geodäsie.

Um die Jahrtausendwende gingen dann an den geodätischen Instituten der UniBw M viele der Vertreter der ersten Stunde in den Ruhestand, was nicht nur eine Neubesetzung der meisten Professuren, sondern auch eine grundlegende Reform des Vermessungsstudiengangs ermöglichte. Wichtig im Kontext dieses Beitrags ist hier vor allem die Berufung des Jubilars, Helmut Mayer, zum ordentlichen Universitätsprofessor für Photogrammetrie und Fernerkundung im Jahr 1999. Wie schon sein Vorgänger Egon Dorrer ist auch Helmut Mayer ein Spross des TUM-Instituts für Photogrammetrie und Kartographie, wo er 1993 seine Promotion zum Dr.-Ing. als Schüler des damaligen Ordinarius für Photogrammetrie und Fernerkundung, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. habil. Heinrich Ebner, zum Thema „Automatische wissensbasierte Extraktion von semantischer Information aus gescannten Karten“ abschloss. Helmut Mayer blieb dem Institut bis zu seiner

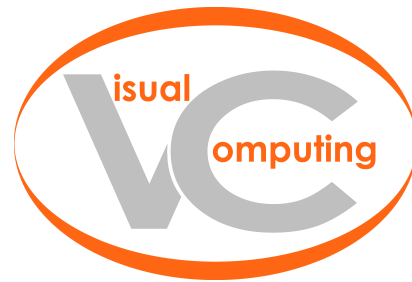


Berufung an die UniBw M treu und nutzte die Zeit, um sich 1998 zum Thema „Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern“ zu habilitieren. Schon aus den Titeln dieser beiden großen wissenschaftlichen Arbeiten geht der Schwerpunkt von Prof. Mayers Wirken in der Forschung hervor: Die automatische Analyse von photogrammetrischen Bilddaten – auch mit modernen Methoden der zunehmend an Bedeutung gewinnenden Computer Vision. Eine Schwerpunktsetzung, die sich später noch als wichtig darstellen wird.

Jedenfalls fiel die Berufung von Helmut Mayer in die oben erwähnte Zeit der Neuorientierung im Vermessungsstudiengang, der seine Schwerpunkte nunmehr weniger im amtlichen Vermessungswesen, als vielmehr in immer wichtiger werdenden Teildisziplinen wie Geoinformatik oder Navigation setzen sollte und daher zum Beginn des Frühjahrstrimester 2000 auch einen neuen Namen bekam: Aus „Vermessungswesen“ wurde „Geodäsie und Geoinformation“.

Bedauerlicherweise sollte diese zukunftsweisende Neuorientierung nicht von langer Dauer sein: Im August 2005 ordnete General Dieter, Stellvertreter des Generalinspektors der Bundeswehr und Inspekteur der Streitkräftebasis, die Einstellung des Studiengangs zum Ende des Jahres 2012 an (Reinhardt, 2024). Aufgrund der recht geringen Auslastung des Studiengangs mit durchschnittlich nur knapp 11 Studienanfängern in den Jahren 2001 bis 2005 wurde auch auf die sonst im Rahmen des Bologna-Prozesses anstehende Umstellung auf Bachelor und Master verzichtet.

Aufgrund dieser Studiengangseinstellung wurde der Cluster der geodätischen Arbeitsgruppen zerschlagen und einzelne Institute in neuer Zusammensetzung neuen Fakultäten zugeordnet (vgl. Tabelle 1). Für die Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung ging es also bereits zum Herbsttrimester 2007 an die Fakultät für Informatik, wo später zusammen mit der Professur für Geoinformatik (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reinhardt) und der Professur für Softwarewerkzeuge und Methoden für integrierte Anwendungen (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Karcher) das Institut für Angewandte Informatik formiert wurde. Konsequenterweise folgte für Helmut Mayer im Jahre 2012 dann auch die Umbenennung der Professur: Aus „Photogrammetrie und Fernerkundung“ wurde „Visual Computing“.



**Abbildung 2:** Das Logo der heutigen Professur für Visual Computing.

## 4 Visual Computing

Der Übergang von Photogrammetrie und Fernerkundung zu Visual Computing wurde von Prof. Helmut Mayer selbst bereits in der Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Brunner (Institutskollege und Inhaber der Professur für Kartographie und Topographie bis 2012) ausführlich und mit Blick vor allem auf die wissenschaftlichen Inhalte beschrieben (Mayer, 2012). Basierend auf dieser Quelle sei an dieser Stelle nur noch eine quintessenzielle Zusammenfassung gegeben. Helmut Mayer führt in seiner Einleitung als disruptivste Veränderung für die moderne Photogrammetrie und Geoinformatik die Einführung von Diensten wie Google Maps und Microsoft Virtual Earth (später bekannt als Bing Maps) auf, da diese von nicht-geodätischen, sondern zur Domäne der Informatik gehörenden Großkonzernen bereitgestellt wurden. Das Kerngeschäft der Photogrammetrie, nämlich die Bereitstellung großer Mengen georeferenzierter Bilder und die Ableitung von dreidimensionalen Informationen sei dadurch praktisch über Nacht von der bisherigen Fachgemeinschaft in die noch im Aufschwung befindliche Fachgemeinschaft der Computer Vision gewandert. Helmut Mayer beschreibt die Veränderung in eigenen Worten:

*„Der Weg des Autors von der Geodäsie in die Informatik war aber dennoch mehr ein Unfall durch Sparbemühungen, als der Versuch, auf den Lauf der Zeit zu reagieren. Er führte im Endeffekt aber zu einem ähnlichen Ergebnis, nämlich Photogrammetrie mit vielen neuen Inhalten und daher im neuen Umfeld auch zu dem neuen Namen „Visual Computing“. Visual Computing ist hierbei ein Überbegriff, der Computer Vision und Graphik umfasst, zwei als für die Zukunft bedeutend angesehene Bereiche, die bisher in der Informatik der UniBw München brach lagen und deren Besetzung daher willkommen war.“*

Es war dabei ganz sicher nicht von Schaden, dass Helmut Mayer einer jener Photogrammeter war, die sich von Anfang an für die Computer Vision begeisterten und schon in frühen Arbeiten wie Dissertations- und Habilitationsschrift nicht nur auf geometrische Fragen, sondern auch auf eine semantische Bildinterpretation abstellten. Auch fallen in Prof. Mayers Publikationsliste schon früh einschlägige Beiträge, z.B. zum Symposium der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung (Mayer et al., 1993), der 12. IAPR International Conference on Pattern Recognition (Maderlechner & Mayer, 1994) oder der 5. European Conference on Computer Vision (Mayer et al., 1998) auf. So fiel der Übergang von Geodäsie zu Informatik sicher nicht ganz so schwer. Projektive Geometrie, automatische Objektextraktion, statistische und auf maschinellem Lernen basierende Verfahren zur automatischen Bildanalyse beschäftigen die Arbeitsgruppe von Helmut Mayer bis heute (vgl. Abbildung 3). Dies spiegelt sich auch in den erfolgreich abgeschlossenen Doktorarbeiten wieder: Diese adressieren beispielsweise die automatisierte Ableitung von 3D-Objekten aus LiDAR-Daten (Arefi, 2009), hochauflösenden optischen Bildern (Ton, 2011; Kuhn, 2014) oder mit beliebiger Sensorik generierten Punktwolken (Nguatam, 2021). Bedingt eine solche Objektrekonstruktion immer zumindest ein implizites semantisches Verständnis der Zielobjekte, fokussieren andere von Prof. Mayer betreute Promotionen direkt auf einer semantischen Bildanalyse, vor allem für eine automatische Auswertung von Fassadenbildern (Reznik, 2009; Rahmani, 2020). Auch die Dissertation von Micheli et al. (2018) zur automatischen Bestimmung von Kamerapositionen und -orientierungen in komplexen Bildmengen stellt ein Paradebeispiel für moderne photogrammetrische Computer Vision dar.

Besondere Erwähnung soll an dieser Stelle außerdem die Dissertation von PD Dr.-Ing. habil. Hai Huang zur Extraktion unbelaubter Bäume aus terrestrischen Bildsequenzen (Huang, 2010) finden, ist Dr. Huang doch seit vielen Jahren der Professur für Visual Computing treu verbunden – zuletzt als unbefristet beschäftigter Oberassistent von Prof. Mayer.

In der Lehre vertreten die beiden unter anderem Bildverarbeitung, Computer Vision, Visual Computing und optische Fernerkundung; die Fernerkundung mit aktiven Sensoren (Radar und Laser) wurde über viele Jahre von Honorarprofessor Dr. Helmut Süß gelehrt und wird heute von der Fakultät für Luft- und

Raumfahrttechnik importiert – dazu aber später noch mehr.

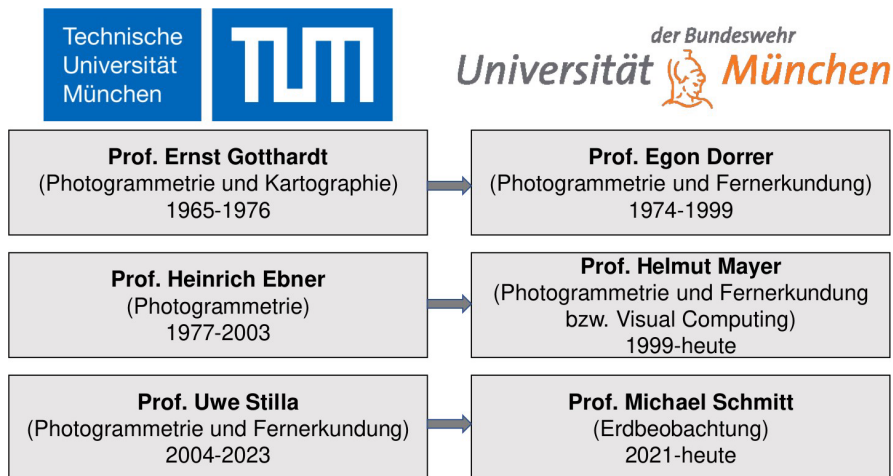


**Abbildung 3:** Automatisch mit Hilfe eines Verfahrens, das Computer Vision und Photogrammetrie kombiniert, interpretierte Gebäudefassade aus einer Arbeit von Prof. Mayer (Mayer & Reznik, 2006).

## 5 Erdbeobachtung

Nach Jahren der Vorbereitung gelang es der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der UniBw M eine neue Professur einzurichten: Die Professur für Erdbeobachtung. Diese wurde als Teil des Instituts für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung implementiert, um dieses bislang aus den Professuren für Raumfahrttechnik (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roger Förstner), Satellitennavigation (Univ.-Prof. Mag. Dr. habil. Thomas Pany) und Raumflugbetrieb (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Felix Huber), um eine Komponente der Weltraumnutzung zu ergänzen. Nach einem COVID19-bedingt langwierigen Berufungsverfahren wurde zum 1. September 2021 Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmitt auf diese neu gegründete Professur berufen. Wie schon Egon Dorrer und Helmut Mayer ist auch er letztendlich ein Absolvent des mittlerweile aufgelösten Instituts für Photogrammetrie und Kartographie der TUM (vgl. Abbildung 4), nachdem er dort unter der Betreuung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla im Jahr 2014 zum Dr.-Ing. promoviert wurde und sich 2018 als Mitarbeiter der aus dem Kontext des früheren Instituts entstandenen Professur für Signalverarbeitung in der Erdbeobachtung habilitierte.

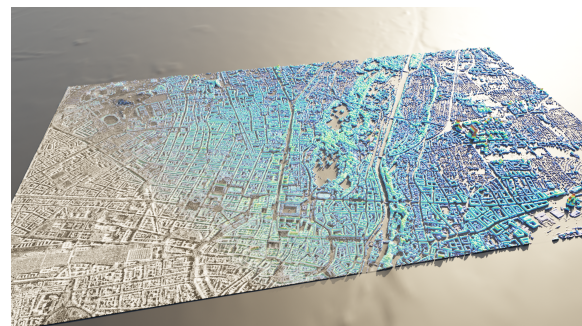
Schon seit den Tagen der Promotion war Michael Schmitts Arbeitsschwerpunkt stets im Bereich der methodischen Fernerkundung verortet, fokussierte also auf die Entwicklung neuer Verfahren und Algorithmen für eine automatische Bild- und Signalverarbeitung von Fernerkundungsdaten. Von Anfang an galt eine besondere Leidenschaft der Radarfernerkundung, später kam dann auch eine intensive Beschäftigung mit modernen Verfahren des



**Abbildung 4:** Drei Generationen von Photogrammetrie-Professoren an der Technischen Universität München brachten bis heute drei Generationen von fachlich einschlägigen Professoren an der Universität der Bundeswehr München hervor, die das klassische Fachgebiet jeweils modernisierten und verbreiterten.

maschinellen Lernens (gerade im politischen Kontext gerne KI – Künstliche Intelligenz – genannt), hinzu (vgl. Abbildung 5). So lag es nahe, die früher von Hon.-Prof. Dr. Helmut Süß gehaltenen Lehrveranstaltungen „Radar- und Lasermethoden“ (für Studierende der Luft- und Raumfahrttechnik und Studierende der Informatik), sowie „Einführung in die Fernerkundung“ (für Studierende der Luft- und Raumfahrttechnik) zu übernehmen. Nach den ersten Jahren des Übergangs hat sich das Lehrportfolio mittlerweile sortiert, sodass neben der noch immer bestehenden „Einführung in die Fernerkundung“ auch eine LRT-eigene „Optische Fernerkundung“, sowie eine neu konzipierte „Radarfernerkundung“, die auch in die Fernerkundungsmodule von Helmut Mayer exportiert wird, abgehalten werden.

Mit der Gründung der Professur für Erdbeobachtung schließt sich also der im Titel dieses Beitrags skizzierte Kreis von der Photogrammetrie & Fernerkundung zur Erdbeobachtung. Die Zusammenarbeit zwischen den Fakultäten für Informatik und Luft- und Raumfahrttechnik bzw. zwischen Helmut Mayer und Michael Schmitt ist unkompliziert und fruchtbar. So verwundert es auch nicht, dass Prof. Mayer und sein Team 2024 schon zum zweiten Mal an der jährlich von der Professur für Erdbeobachtung organisierten „Munich Autumn School on Remote Sensing“, einer 3-tägigen Forschungsklausur für Promovierende aus dem Bereich der Fernerkundung und dem Münchner Raum, teilnehmen, um den Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern eine Plattform für fachlichen Austausch und Vernetzung mit Gleichgesinnten innerhalb und außerhalb der Universität zu bieten.



**Abbildung 5:** Das SAR2Height-Verfahren als Beispiel der modernen Fernerkundungsforschung an der Professur für Erdbeobachtung (Recla & Schmitt, 2024): Ein einzelnes Radarsatellitenbild wird mit Hilfe einer Kombination aus künstlicher Intelligenz und Radarsignalverarbeitung in ein 3D-Oberflächenmodell umgewandelt.

## 6 Ausblick

Mit den Professuren für Visual Computing und Erdbeobachtung brennt die Flamme der Photogrammetrie & Fernerkundung nach Münchner Schule auch 50 Jahre nach Gründung der Universität der Bundeswehr München in modernisierter Form weiter. Zusammen mit der Professur für Satellitennavigation der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, der aktuell im Berufungsverfahren befindlichen Professur für Geoinformatik der Fakultät für Informatik und den Professuren für Ingenieurgeodäsie und Landmanagement des Instituts für Geodäsie an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften ist noch immer ein nahezu komplettes geodätisches Kompetenzprofil an der Universität vorhanden – nur

ohne eigenen Studiengang. Seltsam mutet es da an, dass seit 2020 Offizieranwärter im Geoinformationsdienst der Bundeswehr ein dreijähriges Studium an der Beuth Hochschule für Technik in Berlin zum Bachelor of Engineering im Fachgebiet Geoinformation mit den optionalen Vertiefungsrichtungen Geoinformatik, Geodäsie oder Geomedien absolvieren können<sup>1</sup>. Vielleicht kann in Zukunft wieder über einen „hauseigenen“ Geo-Studiengang nachgedacht werden? Natürlich, wie schon vor 20 Jahren wieder in modernisierter Form, um den rasanten Entwicklungen im Bereich der Geodatenanalyse Genüge zu tun. Man denkt hier an Kenntnisse aus den Bereichen Programmierung, Big Data Analytics, Sensorik, Raumbezug, maschinelles Lernen – aber sicher auch an nach wie vor hochrelevante Teildisziplinen wie Navigation und Fernerkundung.

## Literatur/Quellen

- Arefi, H. (2009) *From LIDAR Point Clouds to 3D Building Models*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.
- Brunner, K. (1994) *Ausbildung im Studiengang Vermessungswesen an der Universität der Bundeswehr München*. *Mitteilungsblatt des DVW Bayern* 46 (1): 64-70
- Brunner, K., Dorrer, E. (1994) *Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr München*. *Mitteilungsblatt des DVW Bayern* 46 (1): 80-92
- Dorrer, E. (2001) *Geodäsie und Geoinformation an der Universität der Bundeswehr München*. *DGPf Tagungsband 10*: 590-591
- Huang, H. (2010) *Extraction of Unfoliated Trees from Terrestrial Image Sequences*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.
- Kuhn, A. (2014) *Scalable 3D Surface Reconstruction by Local Stochastic Fusion of Disparity Maps*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- Mayer, H. (2012) *Von Photogrammetrie und Fernerkundung zu Visual Computing*. In: Beineke D, Heunecke O, Horst T, Kleim UGF (Hrsg.) *Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Brunner anlässlich des Ausscheidens aus dem aktiven Dienst*. *Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München* 87: 157-165
- Mayer, H., Heipke, C., Maderlechner, G. (1993) *Wissensbasierte automatische Extraktion von semantischer Information aus Katasterkarten*. In: Pöpl SJ, Handels H (Hrsg.) *Mustererkennung 1993. Mustererkennung im Dienste der Gesundheit*. *Informatik aktuell* 15: 367-374
- Mayer, H., Laptev, I., Baumgartner, A. (1998) *Multi-scale and snakes for automatic road extraction*. In: Burkhardt H, Neumann B (Hrsg.) *Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Conference on Computer Vision. Lecture Notes in Computer Sciences* 1406: 720-733
- Mayer, H., Reznik, S. (2006) *MCMC Linked with Implicit Shape Models and Plane Sweeping for 3D Building Facade Interpretation in Image Sequences*. In: Förstner W, Steffen R (Hrsg.) *Symposium of ISPRS Commission III "Photogrammetric Computer Vision"*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3): 130-135
- Michelini, M. (2018) *Automatische Kameraposeschätzung für komplexe Bildmengen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- Nguatam, W. (2021) *Urban Modeling from Point Clouds*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- Rahmani, K. (2020) *Facade Interpretation from Images*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- Recla, M., Schmitt, M. (2024) *The SAR2Height framework for urban height map reconstruction from single SAR intensity images*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 211: 104-120
- Reinhardt, W. (2024) *Persönliche Email-Kommunikation*.
- Reznik, S. (2009) *Aussehensbasierte generative hierarchische Interpretation von Fassaden in terrestrischen Bildsequenzen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- Stilla, U. (2009) *60 Jahre Institut für Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität München*. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 5/2009: 385-392
- Ton, D. H. A. (2011) *3D Least Squares Based Surface Reconstruction*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München

### **Anschrift des Verfassers:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmitt  
 Professur für Erdbeobachtung (LRT 9.3)  
 Institut für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung  
 Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
 Universität der Bundeswehr München  
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg  
 michael.schmitt@unibw.de

<sup>1</sup><https://www.bundeswehr.de/de/organisation/cyber-und-informationsraum/aktuelles/ein-ganz-besonderes-studium-5012434>, letzter Zugriff am 4. Juni 2024

# Einziehung von Rezess- und Flurbereinigungswegen

## Zusammenfassung

Der Beitrag behandelt die Einziehung von Wirtschaftswegen, die im sog. norddeutschen Rechtskreis, das heißt den heutigen Bundesländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und teilweise Hessen, nach Landesrecht in älteren Bodenordnungsverfahren als landwirtschaftliches Zweckvermögen und Interessentenwege angelegt wurden. Im süddeutschen Rechtskreis, das heißt den heutigen Ländern Baden-Württemberg und Bayern, wurden die Feldwege in der Regel als öffentliche Gemeindestraßen ausgewiesen, deren straßenrechtliche Einziehung formalrechtlich problemlos ist. Ebenso ist das Thema für Ostdeutschland bedeutungslos, weil das Wegenetz schon zu DDR-Zeiten im Zuge der Großflächenbewirtschaftung stark ausgedünnt wurde. Ferner werden wesentliche Aspekte zur Einziehung von neueren Flurbereinigungswegen erörtert, die bundesweit von Bedeutung sind.

## Summary

This article deals with the confiscation of farm roads that were created in the so-called North German legal system of the Federal Republic of Germany, i.e., in today's federal states of Schleswig-Holstein, Lower Saxony, North Rhine-Westphalia, Rhineland-Palatinate and partly Hesse, according to state law in older land consolidation procedures as agricultural special-purpose assets and interested parties' roads. In southern Germany, i.e., in the present-day states of Baden-Wuerttemberg and Bavaria, the field paths were generally designated as municipal roads, the confiscation of which under road law is formally problem-free. Similarly, the issue is meaningless for eastern Germany because the network of roads was already severely thinned out in GDR times during large-scale land management. Finally, essential aspects of the confiscation of newer land consolidation routes that are of nationwide significance are discussed.

ziplinen, deren Erkenntnisse oft allgemeingültig sind und vielfach global gelten.

## 1 Vorbemerkung und Motivation

Freizeit und Erholung in der Natur liegen im Trend. Um sich in der Landschaft zu bewegen, werden ländliche Wege zum Spazierengehen, Wandern und Radfahren genutzt. Die Wenigsten sind sich jedoch dabei bewusst, welchen rechtlichen Status die Feldwege in der Kulturlandschaft haben. Dies wird zum Problem, wenn nicht mehr benötigte oder aus anderen Gründen zu beseitigende Wege eingezogen werden sollen. In diesem Zusammenhang entstand der vorliegende Beitrag aus Fragestellungen, die in den letzten Jahren von Bürgern, Landwirten und Kommunen an den Autor herangetragen wurden. Der Artikel stellt eine Zusammenfassung der Aspekte dar, die bei der Einziehung von Wirtschaftswegen zu beachten sind.

Ferner verdeutlicht die Thematik anschaulich, dass das Landmanagement als grund- und bodenbezogenes Handeln in der Regel in einen regionalen Kontext eingebunden ist, und sich viele Fragestellungen nicht allgemeingültig, sondern nur mit diesem Ortsbezug lösen lassen. Dies gilt sowohl für die Praxis als auch für die wissenschaftliche Forschung. Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied zu anderen Dis-

## 2 Einführung

„Wirtschaftsweg“ ist kein straßen- und wegerechtlicher, sondern ein planungstechnischer Begriff. Die neuen „Richtlinien für den Ländlichen Wegebau“ (DWA, 2016) unterscheiden zwischen Verbindungswegen sowie Feld- und Waldwegen zur weiteren Erschließung der Agrarlandschaft. Dabei wird bei den Feldwegen entsprechend ihrer Verkehrsbedeutung zwischen Hauptwirtschaft- und Wirtschaftswegen differenziert. Während Hauptwirtschaftswege mit einer Maschenweite von etwa 1,5 km größere Gebiete erschließen, sollen die Wirtschaftswege in erster Linie die notwendige Zuwegung der landwirtschaftlichen Nutzflächen gewährleisten. Darüber hinaus dienen sie in vielfältiger Weise auch dem allgemeinen Verkehr sowie der landschaftsgebundenen Freizeitgestaltung und Erholung als Fuß- und Radwege, was zu einer multifunktionalen Nutzung führt.

Befestigte Wirtschaftswege haben in der Regel eine Fahrbahnbreite von 3,0 m und je 0,5 m breite Seitenstreifen. Typische Ausbauweisen sind die Vollbefes-

tigung als Asphalt- oder Betonweg, der Spurbahnweg mit begrüntem Mittelstreifen und die leichte Befestigung in Form des sog. Schotterwegs. Unbefestigte Wirtschaftswege weisen eine Breite von etwa 3,0 m auf und werden auch als Erd-, Gras- oder Grünwege bezeichnet. Schotter- und Grünwege eignen sich insbesondere für durchgängige Verbindungen mit sehr geringem Verkehrsaufkommen und als Stichwege zur Erschließung der anliegenden landwirtschaftlichen Grundstücke (DWA, 2016).

Die überkommene und heute vorhandene Wegestruktur ist in Westdeutschland generell zu engmaschig. Dies hat zur Folge, dass sowohl zur Ermöglichung rentabler Schlaggrößen im Ackerbau als auch im Zuge der weiteren Kulturlandschafts- und Siedlungsentwicklung die Notwendigkeit besteht, vorhandene Feldwege einzuziehen. Dabei handelt es sich in der Regel um leicht befestigte Schotterwege oder unbefestigte Grünwege; die Beseitigung von Wirtschaftswegen in Vollbefestigung oder Spurbahnbaweise kommt in der Regel nur im Rahmen der Planung und Realisierung neuer Baugebiete vor.

Das Wegenetz ist zum Teil historisch gewachsen, wurde jedoch überwiegend im Rahmen der ländlichen Neuordnung geschaffen. Daher betrifft die Einziehung von Wirtschaftswegen vielfach Wege aus älteren Bodenordnungsverfahren, die im norddeutschen Rechtskreis als landwirtschaftliches Zweckvermögen angelegt wurden. Im Folgenden soll den besonderen Rechtsverhältnissen dieser Wege nachgegangen werden.

### 3 Kurze Historische Einordnung

In Norddeutschland hat die Flurbereinigung ihre Wurzeln in der sog. Bauernbefreiung als Folge der französischen Revolution (Berkenbusch, 1972; Kroschell, 1979; Weiß 1990). Dabei ging es zu Beginn des 19. Jahrhunderts um die Schaffung eines freien Bauernstandes durch Aufhebung der Leib- und Grundherrschaft (Regulierung der gutsherrlich-bäuerlichen Verhältnisse), die Ablösung von Reallasten (Servituten) sowie die Aufteilung der im Dorfverband gemeinschaftlich genutzten Allmenden (Gemeinheitsteilung). In der Regel war die Regulierung der gutsherrlich-bäuerlichen Verhältnisse dabei auch mit einer Gemeinheitsteilung verbunden. Die Verfahren zur persönlichen und wirtschaftlichen Befreiung der Bauern wurden in den damaligen Ländern höchst unterschiedlich benannt und unter dem Oberbegriff der Auseinandersetzung zusammengefasst (Jamin, 1985).

Erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entstand die Zusammenlegung zersplitterten Grundbesitzes als eigenständige Neuordnungsaufgabe, weil die Regulierung der gutsherrlich-bäuerlichen Verhältnisse und die Gemeinheitsteilung allmählich zum

Abschluss kamen. Man spricht deshalb auch vom „Jahrhundert der Auseinandersetzung“. Die sich erst danach etablierende Zusammenlegung wurde vor allem in Preußen als Umlegung bezeichnet und insbesondere in der Preußischen Umlegungsordnung (PrUO) vom 21.09.1920 (PrGS. S. 453) näher geregelt (LÖBF, 1996).

Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts beruhte sowohl die Auseinandersetzung der Gemeinheiten und gutsherrlich-bäuerlichen Verhältnisse als auch die Zusammenlegung von Grundstücken jeweils auf einem ausgehandelten Vertrag. Dabei waren auch Mehrheitsbeschlüsse und hoheitliche Festsetzungen möglich, um trotz widerstreitenden Interessen einen Abschluss zu erreichen. Der Vertrag hielt das erzielte Ergebnis des Verfahrens in Text und Karten fest und wurde entsprechend den damaligen Gepflogenheiten für derartige landes- oder ortsrechtliche Vergleiche als Rezess bezeichnet (Jamin, 1985). So auch noch in § 7 des Gesetzes über die Rechtsstellung der Gesamtheit der Umlegungsbeteiligten vom 22.07.1935 (PrGS. S. 99). Rechtliche Wirkung erlangte ein Rezess aber erst durch die abschließende behördliche Genehmigung.

In den Auseinandersetzungs- und Zusammenlegungsverfahren war der ländliche Wegebau neben anderen kulturbautechnischen Maßnahmen von Beginn an ein wesentliches Element, um die neu geschaffenen Grundstücke adäquat nutzen zu können. Der Rezess wies die Wege, aber auch die anderen im Verfahren geschaffenen gemeinschaftlichen Anlagen, wie Gräben, Tränkstellen, Lehm-, Sand- und Kalkgruben sowie Feuerlöschteiche und Friedhöfe, als ungeteiltes Gesamthandsvermögen der Beteiligten aus. Da die Beteiligten als Interessenten bezeichnet wurden, bilden sie die Interessentengemeinschaft oder kurz Interessentenschaft, der fortan das Eigentum und die Nutzung an den neu entstandenen landwirtschaftlichen Zweckgrundstücken gemeinschaftlich zustand. Darüber hinaus war die Interessentenschaft auch für die Unterhaltung und weitere Verwendung der Zweckgrundstücke verantwortlich.

Nach Gründung der Bundesrepublik Deutschland erfolgte regional unterschiedlich eine straßenrechtliche Widmung dieser Wege als öffentliche Feldwege (Schleswig-Holstein), eine Überführung in Realverbandsvermögen (Niedersachsen) oder eine Übernahme durch die Gemeinde als kommunale Einrichtungen (Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Hessen).

Aus diesen Entstehungszusammenhängen folgt, dass die Einziehung eines Rezesswegs sowohl den heutigen rechtlichen Status berücksichtigen muss als auch die diesbezüglich noch gültigen Festsetzungen des alten Auseinandersetzungs- bzw. Zusammenlegungsverfahrens, in dem der Weg entstanden ist, zu beachten hat. Sofern später ein neuzeitliches Flurbereinigungsverfahren nach dem FlurbG als sog.

Zweitbereinigung stattgefunden hat, sind die Regelungen des vorlaufenden Erstverfahrens untergegangen, sodass nur die Aufhebung eines Flurbereinigungswegs ansteht.

#### 4 Vertretung der Interessentenschaften

Die Rechtspersönlichkeit der Interessentenschaft ist als Rechtsgemeinschaft (Gesamthandsgemeinschaft eigener Art) des privaten Rechts zu charakterisieren, die eine eingeschränkte Teilrechtsfähigkeit zur Wahrnehmung ihrer eigenen Angelegenheiten hat und durch Vereinbarung aller Mitglieder ihre Organisation selbst bestimmen kann (Schneider, 1989; OLG Naumburg, 2015). In der Regel sind solche Vereinbarungen jedoch nicht getroffen worden und es wurden allenfalls einzelne Personen mit der Vertretung und Verwaltung der gemeinschaftlichen Angelegenheiten betraut (Schneider, 2003). Dies hatte wiederum zur Folge, dass die Interessentenschaften in der Folgezeit regelmäßig handlungsunfähig geworden sind, weil die sie repräsentierenden Personen verstarben und Nachfolgeregelungen nicht existierten. Wie die heutige Rechtsprechung herausgestellt hat, ist eine Neukonstituierung durch Beschluss eines Status jedoch nur möglich, wenn alle Interessenten lückenlos ermittelt und beteiligt werden, was – wenn überhaupt – nur mit erheblichem Aufwand möglich ist. Denn durch Vererbung oder Verkauf fanden mitunter komplexe Eigentumsveränderungen statt, die nur schwer nachzuvollziehen sind, zumal bis zum 01.01.1900 auch kein Eigentumsnachweis über das Grundbuch bestand (Thiemann, 2015).

Diese Probleme waren in Preußen Anlass zum Gesetz vom 02.04.1887, betreffend die durch ein Auseinandersetzungsverfahren begründeten gemeinschaftlichen Angelegenheiten (PrGemAngG, PrGS. S. 105), welche für die weitere Entwicklung im norddeutschen Rechtskries richtungsweisend war (Pannwitz, 1957; Quadflieg, 1967, S. 16. f.).

Das PrGemAngG weist der Interessentenschaft aber keine neue und zweckmäßigere Rechtspersönlichkeit zu, sondern bestimmt, dass ihre Vertretung Dritten gegenüber und die Verwaltung der eigenen Angelegenheiten nach Abschluss des Verfahrens von der Auseinandersetzungsbehörde (heute Flurbereinigungsbehörde) auf Antrag dem Vorstand (heute Bürgermeister) der Gemeinde zu übertragen ist, sofern die Vertretung und Verwaltung nicht anderweitig geregelt sind oder die Zuziehung der einzelnen Beteiligten bzw. ihrer Vertreter einen unverhältnismäßig hohen Zeit- und Kostenaufwand erfordern würde (§ 1 und § 2 Abs. 1 PrGemAngG). Da das Antragsrecht in § 1 Abs. 2 PrGemAngG nicht weiter beschränkt ist, konnte das Gesetz immer dann angewendet werden, wenn es Probleme in Bezug auf die Vertretung und Verwaltung gab.

Formalrechtlich war der Antrag zur Übertragung der Vertretung und Verwaltung auf den Gemeindevorstand von der zuständigen Auseinandersetzungsbehörde ortsüblich öffentlich bekanntzumachen mit der Aufforderung, Einwendungen innerhalb einer gesetzten Frist vorzubringen (§ 3 Abs. 2 f. PrGemAngG). Nach anschließender Erörterung mit dem Gemeindevorstand (§ 3 Abs. 4 PrGemAngG) erging der Übertragungsbeschluss, gegen den innerhalb einer Frist von zwei Wochen nach erfolgter Zustellung (ebenefalls durch öffentliche Bekanntmachung, § 7 Abs. 1 PrGemAngG) Beschwerden beim Oberlandeskulturgericht (heute Flurbereinigungsgericht beim Oberverwaltungsgericht) möglich war (§ 10 PrGemAngG).

Der Gemeindevorstand hat damit eine umfassende Vertretungsbefugnis erhalten, die nur der Kommunalaufsicht untersteht (§ 2 Abs. 2 und § 6 Abs. 1 Satz 1 PrGemAngG). Ferner muss er die Verwaltung so wahrnehmen, wie es die Kommunalverfassung für Gemeindeangelegenheiten vorsieht (§ 6 Abs. 1 Satz 2 PrGemAngG), also vor allem für eine ordnungsgemäße Unterhaltung der gemeinschaftlichen Anlagen nach Maßgabe der Bestimmungen in § 6 Abs. 2–4 PrGemAngG Sorge tragen.

Aus § 4 und § 7 Abs. 3 PrGemAngG geht hervor, dass die Übertragung der Vertretung und Verwaltung im Regelfall nicht schon Verfügungen über die Substanz der gemeinschaftlichen Anlagen miteinschließen sollte. Vielmehr stand eine Änderung oder Aufhebung der Zweckbindung sowie eine anderweitige Verwendung bzw. Veräußerung der Zweckgrundstücke unter dem Genehmigungsvorbehalt der Auseinandersetzungsbehörde. Dabei war für die Genehmigung ebenfalls das oben genannte formelle Verfahren anzuwenden. Unabhängig von der Vertretung und Verwaltung konnte dem Gemeindevorstand also bei Bedarf die Einziehung von Wegen erlaubt werden. Die Interessenten waren dabei durch die öffentliche Bekanntmachung der beabsichtigten Genehmigung sowie die öffentliche Bekanntmachung der Genehmigung selbst mit einbezogen und konnten Einwände vorbringen bzw. Beschwerde einlegen.

#### 5 Ablösung des alten Landesrechts

Bekanntermaßen hat die Reichsumlegungsordnung (RUO) vom 16.06.1937 (RGBl. I S. 629) das extrem zersplitterte Landesrecht der ländlichen Bodenordnung in Deutschland durch ein einheitliches Neuordnungsrecht ersetzt. Die RUO trat am 01.01.1938 in Kraft; nur für die preußische Provinz Schleswig-Holstein wurde der Stichtag gemäß der Ermächtigung in § 156 Satz 2 RUO durch die Verordnung über die frühere Inkraftsetzung vom 19.07.1937 (RGBl. I S. 818) auf den 01.08.1937 vorgezogen. Vor allem wegen ihrer rechtsstaatlichen Defizite wurde die RUO schon bald nach Gründung der Bun-

desrepublik Deutschland durch das Flurbereinigungsgesetz (FlurbG) vom 14.07.1953 ersetzt, welches am 01.04.1954 in Kraft trat. Das FlurbG wurde inzwischen 1976 und 1994 novelliert, was bezüglich der hier behandelten Thematik aber keine Rolle spielt. Die relevanten Vorschriften sind unverändert.

Für die Rezesswege aus alten Bodenordnungsverfahren ist die Übergangsregelung in § 156 Satz 3 FlurbG anzuwenden, wonach die Rechtswirksamkeit von Festsetzungen in Bodenordnungsplänen aus der Zeit vor Inkrafttreten des FlurbG nach dem bisherigen Recht zu beurteilen ist. Dabei schließt der Begriff „Rechtswirksamkeit“ auch nachträgliche Änderungen mit ein (BVerwG, 1976). Somit ist die Frage, unter welchen Voraussetzungen Regelungen von Bodenordnungsplänen, die aus Verfahren stammen, die nach altem Landesrecht bearbeitet wurden, nach dem zu dieser Zeit gültigen Landesrecht oder dem dieses Recht ablösenden, neueren Landesrecht zu beurteilen, nicht jedoch nach Bundesrecht und dem FlurbG (BVerwG, 1976; HessVGH, 1979). Derartiges ablösendes Landesrecht kann insbesondere dann, wenn das frühere Recht keine verfahrensrechtlichen Vorgaben enthält, etwa weil diese inzwischen aufgehoben worden sind, auch das aktuelle Landesverwaltungsverfahrensrecht sein (BVerwG, 2015). Auch für Umlegungspläne von Verfahren, die in der Zeit vom 01.01.1938 bzw. 01.08.1937 (für Schleswig-Holstein) bis zum Inkrafttreten des FlurbG nach der RUO angeordnet und oft bis in die 1960er Jahre entsprechend der Übergangsregelung in § 156 Satz 1 FlurbG nach der RUO zu Ende geführt wurden, ist altes Recht, also die RUO, maßgeblich. Jedoch ist die diesbezügliche Regelung in § 61 Abs. 4 RUO identisch mit § 58 Abs. 4 FlurbG, sodass ebenso letztgenannte Regelung angewandt werden kann (OVG RP 1975; Wingerter und Mayr 2018, § 58, Rd.-Nr. 40).

## 6 Einziehung von Rezesswegen

Für die Einziehung von rezessmäßigen Wirtschaftswegen im norddeutschen Rechtskreis ist also das jeweilige Landesrecht anzuwenden, sodass eine länderweise Betrachtung notwendig ist, weil das PrGemAngG höchst unterschiedlich fortentwickelt wurde. Zusätzlich ist das Straßen-, Realverbands- und Kommunalrecht zu beachten, nach denen Interessentenwege weitere öffentlich-rechtliche Zweckbindungen erfahren haben.

### 6.1 Schleswig-Holstein

In Schleswig-Holstein sind Feldwege in der Regel als sonstige öffentliche Straßen gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 4 Buchstabe a) des Straßen- und Wegegesetzes des Landes (StrWG SH) von der Gemeinde als Träger der Straßenbaulast (§ 15 Abs. 1 StrWG SH) mit

der Beschränkung auf den land- und forstwirtschaftlichen Verkehr sowie den Anlieger-, Rad- und Fußgängerverkehr gewidmet (§ 6 Abs. 1–3 StrWG SH). Nach § 3 Abs. 2 StrWG SH hat jede Gemeinde für die auf ihrem Gebiet vorhandenen öffentlichen Gemeindestraßen und damit auch für die öffentlichen Feldwege ein Bestandsverzeichnis als vereinfachte Form des Straßenverzeichnisses zu führen.

Durch die Widmung wird die privatrechtliche Verfügungsbefugnis des Eigentümers über das der Straße dienende Grundstück eingeschränkt und durch eine öffentlich-rechtliche Zweckbestimmung überlagert (Herber, 2010b, Rd.-Nr. 8). § 18 StrWG SH gibt den zuständigen Straßenbaulasträgern daher grundsätzlich auf, das Eigentum an den Straßengrundstücken zu erwerben, um dieses Spannungsverhältnis zu lösen. Bei den rezessmäßigen Wirtschaftswegen war dies nicht möglich, weil das StrWG SH mit der Erwerbsverpflichtung in seiner ursprünglichen Fassung erst zu einem Zeitpunkt (01.10.1962) in Kraft trat, zu dem die Interessentenschaften vielfach schon nicht mehr präsent und handlungsfähig waren. In dieser Situation haben die Gemeinden eine Widmung vorgenommen oder gemäß der Übergangsvorschrift in § 57 Abs. 3 StrWG SH eine öffentliche Straße unterstellt, um sich um die Wege zu kümmern. Dies ist nach den in § 6 Abs. 3 StrWG SH geregelten Widmungsvoraussetzungen zulässig, weil angenommen werden kann, dass die Interessentenschaften die Wege durch konkludentes Handeln für die o. g. Verkehrszwecke zur Verfügung gestellt haben.

Die Rücknahme der Widmung wird als Entwidmung oder Einziehung bezeichnet (§ 8 StrWG SH) und hebt die öffentlich-rechtliche Zweckbindung auf. Bei einem Interessentenweg verbleibt dann die privatrechtliche Vereinbarung der ehemaligen Rezessbeteiligten, den Weg gemeinschaftlich zur Erschließung der anliegenden Grundstücke zu nutzen. Um über die Wegfläche frei verfügen zu können, muss auch diese privatrechtliche Bindung aufgehoben werden, damit der Weg zur bloßen Privatstraße wird, die keinen Restriktionen mehr unterliegt und vom Eigentümer jederzeit eingezogen werden kann (Herber, 2010a, Rd.-Nr. 14). Um dies durchzuführen, muss die Interessentenschaft beteiligt werden und dazu wiederum handlungsfähig sein, was zum PrGemAngG führt.

Das PrGemAngG gilt in Schleswig-Holstein bis heute in der Fassung vom 31.12.1971 (Anlage zum Gesetz vom 05.04.1971, GVOBl. S. 182). In der Neubekanntmachung wurden rein formal die Bezeichnungen aktualisiert (Landeskulturbehörde und Bürgermeister für Auseinandersetzungsbehörde und Vorsteher der Gemeinde) und § 10 PrGemAngG mit der ausschließlichen Beschwerde an das Oberlandeskulturgericht gestrichen, weil § 20 Satz 3 des Gesetzes über die Landeskulturbehörden vom 03.06.1919 hierfür eine Spruchkammer vorsah. Da dieses Gesetz durch § 5 Nr. 1 des Gesetzes einer Neuordnung der



landwirtschaftlichen Staats- und Selbstverwaltung vom 24.02.1973 (GVBl. S. 67) aufgehoben wurde, gilt nunmehr der reguläre Rechtsmittelweg für Entscheidungen der Flurbereinigungsbehörden nach §§ 140 ff. FlurbG. Flurbereinigungsbehörde ist seit Beginn des Jahres 2023 das Landesamt für Landwirtschaft und nachhaltige Landentwicklung (LLnL) mit den vier Außenstellen in Flensburg, Flintbek, Itzehoe und Lübeck.

Ist demnach ein Interessentenweg als öffentliche Straße gemäß § 8 Abs. 1 StrWG SH einzuziehen, weil er keine Verkehrsbedeutung mehr hat oder weil Gründe des öffentlichen Wohls vorliegen, die gegenüber privaten Interessen überwiegen, bietet es sich an, die straßenrechtliche Entwidmung seitens der Gemeinde und die Übertragung der Vertretung und Verwaltung auf den Bürgermeister seitens der Flurbereinigungsbehörde in einem Vorgang durchzuführen. Dazu können sowohl die beabsichtigte Einziehung (§ 8 Abs. 3 StrWG SH) und der Übertragungsantrag (§ 3 Abs. 2 f. PrGemAngG) als auch danach die Einziehungsverfügung (§ 8 Abs. 5 StrWG SH) und der Übertragungsbeschluss (§ 7 Abs. 1 PrGemAngG) jeweils gemeinsam öffentlich bekanntgemacht werden.

Wichtig ist, dass die Übertragung der Vertretung und Verwaltung in Bezug auf den besagten Weg ausdrücklich auch die Genehmigung zu Substanzverfügungen miteinschließt (§ 4 Abs. 2 PrGemAngG) und für den Fall einer Verpachtung oder Veräußerung der Wegefläche angeordnet wird, dass die Auszahlung von Einnahmen zweckgebunden zur Wegeunterhaltung an die Gemeinde erfolgt (§ 5 PrGemAngG). Beim Verkauf kann die grundbuchmäßige Eigentumsumschreibung für ein bisher buchungsfreies Wegegrundstück direkt vollzogen werden, indem für den Erwerber ein neues Grundbuch angelegt wird, ohne dass zuvor ein Grundbuch für die Interessentenschaft eingerichtet sein muss (§ 8 Abs. 1 PrGemAngG). Zum Vollzug der Auflassung ist ferner eine Bescheinigung der Flurbereinigungsbehörde notwendig, dass die Verwendung des Kaufpreises durch Auszahlung an die Gemeinde erfolgt ist (§ 8 Abs. 2 PrGemAngG).

Ist der Interessentenweg gemäß Bestandsverzeichnis der Gemeinde kein öffentlicher Feldweg, entfällt natürlich die straßenrechtliche Einziehung nach § 8 Abs. 1–5 StrWG SH. In diesem Fall ist nur die Übertragung der Vertretung und Verwaltung einschließlich der Genehmigung zu Substanzverfügungen sowie die Anordnung zur Verwendung von Einnahmen notwendig, damit der Bürgermeister über die Wegefläche im Namen der Interessentenschaft verfügen und somit die Zweckbindung aufheben kann.

## 6.2 Niedersachsen

In der preußischen Provinz Hannover sowie in den Ländern Braunschweig, Oldenburg und Schaum-

burg-Lippe existierten vielfältige Personenzusammenschlüsse mit höchst unterschiedlichen Regelungen für das landwirtschaftliche Zweckvermögen und den gemeinschaftlich genutzten Wald (Schneider und Seedorf, 1989). Daher hat das Land Niedersachsen mit dem Realverbandsgesetz (RealVbG) vom 04.11.1969 (GVBl. S. 187) alle Interessentenschaften im Sinne des PrGemAngG sowie alle weiteren in § 1 Nrn. 2–7 RealVbG genannten Wege- und altrechtlichen Waldgenossenschaften einschließlich der noch bestehenden Realgemeinden in Körperschaften des öffentlichen Rechts überführt und lässt auch die Neugründung von Bewirtschaftungs- und Unterhaltungsverbänden nach § 1 Nr. 8 und §§ 48 ff. RealVbG zu (Thomas und Tesmer, 2013). Die Realverbände besitzen Satzungsautonomie und verwalten ihr Vermögen jeweils durch einen gewählten Vorstand und die Mitgliederversammlung. Sie sind nach §§ 37 f. RealVbG ausdrücklich befugt, Rezesspflichten, mit denen die Grundstücke belastet sind, zu ändern oder aufzuheben. Sofern für eine Interessentenschaft die Vertretung nicht geregelt ist, führt die Gemeinde die Vorstandsgeschäfte und vertritt den Realverband nach außen, wobei für die Dauer der Vertretung und Verwaltung vom Erlass einer Satzung abgesehen werden kann (§ 21 Abs. 1 RealVbG). Hierdurch ist sichergestellt, dass alle Interessentenschaften ihre Aufgaben wahrnehmen und sich um ihr Verbandvermögen kümmern.

Die Verbandswege sind Privatwege und Eigentum der Realverbände, insbesondere zur Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Grundstücke. Die Verbandsmitglieder haben gemäß § 7 Abs. 1 RealVbG einen Rechtsanspruch auf Benutzung der Wege entsprechend der bisherigen Nutzungs- und Überlassungspraxis sowie der allgemeinen wirtschaftlichen und technischen Entwicklung (Nds. OVG, 2008). Nach §§ 23 ff. des Niedersächsischen Gesetzes über den Wald und die Landschaftsordnung (NWaldLG) vom 21.03.2002 (GVBl. S. 112) können die Verbandswege im Rahmen des Rechts zum Betreten der freien Landschaft generell als Fußwege genutzt werden und, wenn der Realverband dies duldet, auch als tatsächlich öffentliche Wege zum Radfahren und Reiten. Das Befahren mit Kraftfahrzeugen wird vom NWaldLG nicht erfasst und ist deshalb grundsätzlich nicht erlaubt. Da die Verbandswege Privatwege sind, kann der Realverband einzelne Wege jederzeit einziehen, sofern die Bindung als Zweckvermögen (§ 2 Abs. 1 Nr. 1 RealVbG) dies zulässt, das heißt, die Interessen der Verbandsmitglieder an einer Zuwegung ihrer Nutzflächen nicht beeinträchtigt werden (VG Hannover, 2017; Thomas, 2016).

Im ehemals preußischen Teil von Niedersachsen wurden nicht-öffentliche Wege und andere gemeinschaftliche Anlagen in Rezessen auch den politischen Gemeinden in Eigentum und Unterhaltung zugewiesen. Dies ist heute als vorweggenommene Vereinbarung nach § 44 Abs. 1 RealVbG zu sehen,

wonach die Gemeinde von einem Realverband Aufgabengab und das dazu notwendige Vermögen übernehmen kann. In diesem Fall tritt die Gemeinde an die Stelle des Realverbandes, was auch für die Einziehung von rezessmäßigen Wirtschaftswegen durch einfachen Ratsbeschluss gilt (Nds. OVG, 2016).

### 6.3 Nordrhein-Westfalen

In Nordrhein-Westfalen unterliegen die Feldwege in der Regel nicht als öffentliche Straßen dem Straßen- und Wegegesetz des Landes (StrWG NRW), sondern stellen gemeindliche Einrichtungen im Sinne von § 8 der Gemeindeordnung (GO NRW) dar, die im Rahmen des geltenden Rechts genutzt werden dürfen. Das tatsächliche Wegenetz ist jedoch deutlich umfangreicher als die Wege im kommunalen Eigentum bzw. in kommunaler Unterhaltung, weil rd. 40 % aller Wege Privatwege sind und ebenfalls wichtige Funktionen in der Netzstruktur erfüllen (Hunckel, 2018).

Für die hier betrachteten rezessmäßigen Wirtschaftswegen galt das PrGemAngG in NRW in Verbindung mit dem Gesetz über die Landeskulturbehörden vom 03.06.1919 mit Ausnahme des ehemaligen Freistaats Lippe (heutiger Regierungsbezirk Detmold) zunächst fort, erwies sich jedoch zunehmend als nicht mehr praktikabel. Daher wurde es durch das Gesetz über die durch ein Auseinandersetzungsverfahren begründeten gemeinschaftlichen Angelegenheiten (GemAngG NRW) vom 09.04.1956 (GV. NW. S. 134) abgelöst, um die Regelungen an die Entwicklungen im Kommunalrecht anzupassen und für das gesamte Bundesland anwendbar zu machen. Im Wesentlichen hat das GemAngG NRW die bewährten Vorschriften des PrGemAngG beibehalten, jedoch per Gesetz die Vertretung der Interessentenschaften den Bürgermeistern und die Verwaltung ihrer gemeinschaftlichen Angelegenheiten den politischen Gemeinden übertragen (§ 3 GemAngG NRW). Ferner wurden für Änderungen an rezessmäßigen Festsetzungen die Regelungen aus § 58 Abs. 4 FlurbG inhaltlich übernommen, indem § 2 GemAngG NRW bestimmt, dass alle Festsetzungen, die im gemeinschaftlichen Interesse getroffen worden sind, die Wirkung von Gemeindegemeinschaften haben und mit Zustimmung der Gemeindeaufsichtsbehörde durch Gemeindegemeinschaften geändert oder aufgehoben werden können.

Trotz anfänglicher Bedenken (Pannwitz, 1957, S. 53 f.) hat sich das GemAngG NRW bewährt und dazu geführt, dass seit Ende der 1950er Jahre die rezessmäßigen Wirtschaftswegen und die Flurbereinigungswege sowie die seit jeher kommunalen Feldwege (§ 8 GO NRW) von der Gemeinde gemeinsam verwaltet werden und eine Änderung der Zweckbestimmung bzw. eine Einziehung einzelner Wege durch gemeindliche Satzung erfolgen können. Wird demzufolge die Zweckbindung eines rezessmäßigen

Wirtschaftswegs nach § 7 GO NRW und § 2 GemAngG NRW durch Gemeindegemeinschaft mit Zustimmung der Gemeindeaufsichtsbehörde aufgehoben, kann der Bürgermeister als Vertreter der Interessentenschaft über die Wegefläche frei verfügen. Dabei dürfte § 6 Satz 2 GemAngG NRW greifen, wonach eine Verteilung der Einkünfte aus einer Verpachtung oder einem Verkauf des Wegegrundstücks nicht stattfinden muss, weil die Auskehrung wegen unverhältnismäßig hoher Kosten zur Ermittlung aller Interessenten unzweckmäßig erscheint. Vielmehr kann der Erlös von der Gemeinde zweckgebunden zur Bestreitung der Kosten der Wegeunterhaltung verwandt werden.

### 6.4 Rheinland-Pfalz

In Rheinland-Pfalz bestimmt § 1 Abs. 5 des Landesstraßengesetzes (LStrG RP) ausdrücklich, dass Feldwege keine öffentlichen Straßen sind. Sie stellen vielmehr öffentliche Einrichtungen der Ortsgemeinde zur Daseinsvorsorge im Sinne von § 14 Abs. 2 der Gemeindeordnung (GemO RP) dar. Bei den seit jeher kommunalen Wegen kann die Bereitstellung für eine bestimmte Benutzung durch einfachen Ratsbeschluss erfolgen. Daher ist zur Außerdienststellung ebenfalls nur ein zu veröffentlichender Ratsbeschluss der Ortsgemeinde erforderlich. Oft wird die Frage, welche Wege in einer Gemeinde als Wirtschaftswegen gelten und wie sie benutzt werden dürfen, gemäß § 14 Abs. 2 und § 24 Abs. 1–4 GemO RP in einer Wegebenutzungssatzung geregelt, was zur Folge hat, dass in diesem Fall zur Einziehung eines Feldweges eine Änderungssatzung notwendig ist (Bitterwolf-de Boer und Schaefer, 2010). Bei den rezessmäßigen Wirtschaftswegen muss des Weiteren die Aufhebung der privatrechtlichen Zweckbindung durch die Flurbereinigungsbehörde hinzutreten, wie aus der nachfolgend dargelegten Rechtsentwicklung hervorgeht.

Für die ehemals preußischen Landesteile von Rheinland-Pfalz, das heißt die ehemaligen Regierungsbezirke Koblenz (ohne den oldenburgischen Landesteil Birkenfeld), Trier und Montabaur, wurde das PrGemAngG durch Art. 1 Abs. 2 Nr. 15 des Achten Rechtsbereinigungsgesetzes vom 12.10.1995 (GVBl. S. 421) aufgehoben, weil es schon seit 1945 keine Anwendungsfälle mehr gab (Landtag Rheinland-Pfalz, 1995, S. 42). Indessen sind noch alte Rezesse bzw. Auseinandersetzungspläne gültig, die für Feldwege im Eigentum der Gemeinde eine Zweckbestimmung zur ausschließlich landwirtschaftlichen Nutzung festsetzen (VG Koblenz, 2010). Zur Änderung oder Aufhebung derartiger Bestimmungen ist für den ehemals preußischen Teil von Rheinland-Pfalz § 12 des noch gültigen Preußischen Gesetzes zur Beschleunigung der Umliegung (PrUmlBG) vom 03.12.1935 (PrGS. S. 143) anzuwenden. Die Vorschrift regelt, dass „die Landeskulturbehörde den Auseinandersetzungsplan, auch nachdem seine Ausführung angeordnet ist, ändern und ergänzen kann,

wenn ein überwiegendes wirtschaftliches Bedürfnis der Beteiligten oder allgemeine Rücksichten die Änderung oder Ergänzung der gemeinschaftlichen Anlagen erfordern.“

Da das PrGemAngG als speziellere Regelung in Rheinland-Pfalz aufgehoben wurde, gilt nunmehr § 12 PrUmlBG als allgemeinere Vorschrift. Im Gegensatz zur entsprechenden heutigen Regelung in § 64 FlurbG ist die Anwendung von § 12 PrUmlBG nicht auf die Dauer des einzelnen Verfahrens beschränkt, sondern gilt unbefristet auch für bereits vor Inkrafttreten des PrUmlBG beendete Verfahren. Die Änderung der Zweckbestimmung eines rezessmäßigen Wirtschaftswegs kann daher nur durch das jeweilige Dienstleistungszentrum ländlicher Raum (DLR) als der seit 2003 zuständigen Landeskulturbehörde erfolgen und ist zum Beispiel nicht durch die Gemeinde etwa mittels einfacher Satzung oder Bebauungsplan möglich (OVG RP, 2004; VG Koblenz, 2010). Das DLR hat hierzu einen öffentlich bekanntzumachenden Verwaltungsakt im Sinne einer Allgemeinverfügung zu erlassen und davor den Betroffenen die Möglichkeit des rechtlichen Gehörs nach den allgemeinen Grundsätzen des Verwaltungsverfahrensrechts zu geben. Hierdurch wird die rezessmäßige Zweckbindung des Feldwegs aufgehoben, und die Ortsgemeinde kann über die Wegeflächen verfügen bzw. diese durch Bebauungsplan überplanen.

Für die ehemals bayerischen und hessischen Teile von Rheinland-Pfalz, das heißt die ehemaligen Regierungsbezirke Pfalz und Rheinhessen, scheint die Thematik – soweit ersichtlich – nicht von Bedeutung zu sein. Diese Landesteile gehören historisch betrachtet zum süddeutschen Rechtskreis, in dem rezessmäßige Interessentenschaften und Interessenwege im Allgemeinen nicht entstanden sind.

## 6.5 Hessen

In Hessen stehen die Feld- und Wirtschaftswege als Privatwege in Eigentum und Verwaltung der Gemeinden und stellen öffentliche Einrichtungen im Sinne von § 19 Abs. 1 der Hessischen Gemeindeordnung (HGO) dar. Üblicherweise wird die Benutzung und Unterhaltung gemäß §§ 5, 7 und 51 HGO als Angelegenheit der örtlichen Gemeinschaft durch eine Feldwegesatzung näher geregelt. Dabei werden die Wege lediglich pauschal benannt („alle nicht dem öffentlichen Verkehr gewidmeten Straßen, Wege und Plätze“) ohne sie listen- oder kartenmäßig aufzuführen. Viele Feldwegesatzungen enthalten den Vorbehalt, dass entbehrliche Wege landwirtschaftlich genutzt werden können. Dies macht eine Einziehung ohne weitere Regelung möglich, wenn ansonsten keine zusätzlichen Einschränkungen bestehen, wie nachfolgend dargestellt.

Aus Gründen der Klarheit und Rechtssicherheit erfolgt die Einziehung eines Feldwegs jedoch über-

wiegend durch eine sog. Einziehungssatzung. Gleiches gilt weitestgehend auch für die aus alten Bodenordnungsverfahren hervorgegangenen Wege; nur für die in Nordhessen vereinzelt anzutreffenden Interessentenwege ist das PrGemAngG anzuwenden. Dies erklärt sich aus der Geschichte des heutigen Bundeslandes Hessen und der historischen Rechtsentwicklung.

Durch die Annexion des Kurfürstentums Hessen (Kurahessen) und des Herzogtums Nassau nach dem Deutschen Krieg 1866 durch das Königreich Preußen war ab dieser Zeit dort die preußische Gesetzgebung maßgeblich. Deshalb entstanden die für den norddeutschen Rechtskreis typischen rezessmäßigen Interessentenschaften und Wirtschaftswege im Gebiet des heutigen Regierungsbezirks Kassel ab dieser Zeit insbesondere in Verfahren nach der PrUO. In der Zeit davor und in den übrigen hessischen Staaten wurden Wege in der Regel als sog. Gemeindegliedervermögen angelegt, das heißt als gemeindeeigene Grundstücke, die von den Gemeindegliedern für bestimmte Zwecke benutzt werden durften.

Gemeindegliedervermögen ist mit einer modernen Gemeindeverfassung kaum vereinbar, sodass zu dessen Auflösung in Hessen das Gesetz zur Bereinigung der Rechtsvorschriften über die Nutzungsrechte der Ortsbürger (OrtsBRBerG) vom 19.10.1962 (GVBl. S. 467) erlassen wurde. Wie der Hessische Staatsgerichtshof in seinem ausführlichen und das OrtsBRBerG näher erläuternden Urteil vom 21.09.1966 zur Verfassungskonformität des Gesetzes herausgestellt hat, gilt das OrtsBRBerG jedoch nur für öffentlich-rechtliche und nicht für privatrechtliche Nutzungsverhältnisse (HessStGH, 1966, 1. LS). § 1 OrtsBRBerG hebt insgesamt 16 Rechtsvorschriften aus der Zeit von 1814 bis 1935 auf, die solche Nutzungsverhältnisse betreffen, lässt die Nutzungsberechtigungen als solche aber weiterhin bestehen. Ziel des Gesetzes ist es, die alten Nutzungsrechte mit der Zeit auslaufen zu lassen und somit abzuschaffen, indem eine Neuaufnahme bzw. ein Nachrücken in den Kreis der Nutzungsberechtigten nicht mehr möglich ist, und alle dadurch freiwerdenden Rechte der Gemeinde zufallen (§ 2 OrtsBRBerG). Ferner darf Gemeindegliedervermögen nach § 119 Abs. 2 HGO nicht mehr neu gebildet werden. Darüber hinaus kann die Gemeinde nach § 4 Abs. 1 OrtsBRBerG Nutzungsrechte durch Vereinbarungen mit den Berechtigten ablösen oder durch Satzung gemäß § 4 Abs. 2 OrtsBRBerG in Verbindung mit §§ 5 und 51 Nr. 14 HGO aufheben. Im letztgenannten Fall sind die Betroffenen entsprechend dem Nutzwert des aufgehobenen Rechts angemessen in Geld zu entschädigen. Diese Regelung kann auch für die Einziehung von rezessmäßigen Wirtschaftswegen im Eigentum der Gemeinde angewandt werden, weil diese Wege Gemeindegliedervermögen im Sinne des OrtsBRBerG und § 119 Abs. 2 HGO darstellen (BGH, 2008). Dabei entfällt eine Entschädigung,

denn Wege, die keine Erschließungsfunktion mehr erfüllen, haben auch keinen Nutzwert mehr, der zu entschädigen wäre.

Da das OrtsBRBerG nur öffentlich-rechtliche Nutzungsverhältnisse betrifft, nennt dessen § 7 insgesamt 19 Rechtsvorschriften des alten Agrarrechts aus der Zeit von 1821 bis 1937, die auf private Nutzungsrechte weiterhin anzuwenden sind, so unter Nr. 14 das PrGemAngG. Diese Regelung deckt sich mit den Ausnahmetatbeständen des kurz vor dem OrtsBRBerG erlassenen Gesetzes zur Bereinigung des Hessischen Landesrechts vom 06.02.1962 (GVBl. S. 21), welches neben vielen anderen Vorschriften auch pauschal das gesamte noch bestehende ältere Neuordnungsrecht aufhebt, jedoch unter anderem die Rechtsvorschriften über die Nutzungsrechte der Ortsbürger und die Anwendung von aufgehobenen Rechtsvorschriften auf Tatbestände, die während deren Geltungsdauer bestanden haben, von der Aufhebung ausschließt.

Hieraus folgt, dass für den ehemals preußischen Landesteil von Hessen, das heißt im Wesentlichen den heutigen Regierungsbezirk Kassel, für die Einziehung von rezessmäßigen Wirtschaftswegen im Eigentum von Interessentenschaften das PrGemAngG nach wie vor anzuwenden ist und insofern auf Abschnitt 4 verwiesen werden kann. Nur § 10 PrGemAngG wurde durch § 20 Satz 3 des Gesetzes über die Landeskulturbehörden vom 03.06.1919 dahingehend geändert, dass die Beschwerde an eine Spruchkammer zu richten ist, also die heute gemäß § 141 Abs. 2 FlurbG und §§ 7 ff. des Hessischen Ausführungsgesetzes zum FlurbG beim Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation eingerichtete Spruchstelle für Flurbereinigung.

## 7 Einziehung von Flurbereinigungswegen

Der Vollständigkeit halber soll neben den Rezesswegen auch auf die Einziehung von Flurbereinigungswegen eingegangen werden, obwohl sie keine rezessmäßigen Wirtschaftswegen darstellen, weil mit der RUO von 1937 der Schritt von Rezess zum Plan endgültig vollzogen wurde. In Verfahren nach dem 8. Abschnitt des Landwirtschaftsanpassungsgesetzes (§§ 53–64b LwAnpG) zur Feststellung und Neuordnung der Eigentumsverhältnisse in den neuen Bundesländern, die entsprechend der Zuständigkeitsregelung in § 53 Abs. 3 LwAnpG als Flurneuordnung bezeichnet werden, sind gemäß § 63 Abs. 2 LwAnpG die Vorschriften des FlurbG sinngemäß anzuwenden. Deshalb ist § 58 Abs. 4 FlurbG auch für Flurneuordnungswegen gültig. Wie in Abschnitt 5 dargelegt, gilt § 58 Abs. 4 FlurbG ebenso für Wege, die in Umlegungsverfahren ab 1937/38 nach der RUO entstanden sind. Der sprachlichen Einfachheit wegen sollen Flurbereinigungs-, Flurneuordnungs- und Umlegungswege daher in diesem Abschnitt

unter dem Begriff der Flurbereinigungswege subsumiert werden. Gleiches gilt für den Flurbereinigungsplan in Bezug auf den Bodenordnungsplan nach § 56 LwAnpG und den Umlegungsplan nach § 61 Abs. 1 RUO.

§ 58 Abs. 4 Satz 1 FlurbG bestimmt, dass Festsetzungen des Flurbereinigungsplans, die im gemeinschaftlichen Interesse der Beteiligten oder im öffentlichen Interesse liegen, nach Abschluss des jeweiligen Flurbereinigungsverfahrens die Wirkung von Gemeindecaputungen haben. Diese Wirkungszuweisung gilt jedoch nicht für jedwede Regelung des Flurbereinigungsplans mit dem besagten Inhalt, sondern nur für Festsetzungen, die explizit als unter § 58 Abs. 4 Satz 1 FlurbG fallend im Plantext ausgewiesen sind (OVG RP 2005; VG München, 2013). Sie bleiben als Teil des Flurbereinigungsplans Verwaltungsakt im Sinne einer Allgemeinverfügung, haben aber nach Abschluss des Verfahrens die Wirkung von Gemeindecaputungen und gelten dadurch wie objektives Recht nicht nur gegenüber den Verfahrensbeteiligten, sondern gegenüber jedermann.

In der Regel werden die Zweckbestimmungen der Wirtschaftswegen als gemeinschaftliche Anlagen mit der Beschränkung auf den land- und forstwirtschaftlichen Verkehr sowie den Anlieger-, Rad- und Fußgängerverkehr so ausgewiesen, damit sie diese objektive Wirkung entfalten und unter dem besonderen Schutz des § 58 Abs. 4 Satz 2 FlurbG stehen. Denn hiernach kann die Gemeinde die besagten Regelungen nach Beendigung des Flurbereinigungsverfahrens nur mit einer sog. Abänderungssatzung und Zustimmung der Gemeindeaufsichtsbehörde ändern oder aufheben. Eine solche Abänderungssatzung kann auch in einen Bebauungsplan integriert sein, indem die Aufhebung der Festsetzungen ausdrücklich erklärt und nicht nur schlüssig vorausgesetzt wird. Zur eventuell notwendigen Genehmigung des Bebauungsplanes durch die höhere Verwaltungsbehörde (§ 10 Abs. 2 BauGB) muss dann die Genehmigung der Abänderung durch die Kommunalaufsicht hinzutreten. Als Rechtsbehelf gegen eine Abänderungssatzung ist die Normenkontrollklage vor dem Oberverwaltungsgericht nach § 47 Abs. 1 Nr. 2 VwGO möglich, sofern das jeweilige Landesrecht dies zulässt (Wingerter und Mayr, 2018, § 58, Rd.-Nrn. 31–33).

Bei der Einziehung eines Feldweges durch Abänderungssatzung nach § 58 Abs. 4 FlurbG muss die Gemeinde beachten, dass sie „Festsetzungen im gemeinschaftlichen Interesse der Beteiligten“ aufhebt. Sie ist daher verpflichtet, die Erschließungsfunktion des Weges als Bestandteil der wertgleichen Landabfindung der Anlieger in die Abwägung mit einzustellen und eine Verschlechterung der Zuwegung wegen anderer überwiegender Belange grundsätzlich finanziell auszugleichen. Dies unterscheidet die Einziehung nach § 58 Abs. 4 FlurbG von der straßenrechtlichen Entwidmung, bei der die Anlieger bekannter-

maßen keinen Anspruch auf Aufrechterhaltung des bisherigen Gemeindegebrauchs an einer Straße haben, also dass die Straße nicht geändert oder eingezogen wird. Denn das Straßen- und Wegerecht gewährleistet nicht den Bestand einer günstigen Zufahrtsmöglichkeit, sondern nur die Aufrechterhaltung der Zugänglichkeit der Anliegergrundstücke vom öffentlichen Straßenraum aus als solche (VG München, 2013; Wingerter und Mayr, 2018, § 58, Rd.-Nrn. 34–36). Gleiches dürfte auch für die Außerdienststellung von Wegen als kommunale Einrichtungen der Daseinsvorsorge nach den Gemeindeordnungen in Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Hessen gelten.

Das BVerwG führt hierzu im Urteil vom 18.11.2002 aus: „Bei dem durch die Flurbereinigung geschaffenen Wegenetz kann eine Änderung der Interessenlage daraus resultieren, dass Straßen und Wege die ihnen ursprünglich zugeordnete Verkehrsbedeutung nicht erlangen oder nachträglich verlieren, sodass eine Einziehung in Betracht kommt [... Dabei] bleibt die sich aus dem Straßen- und Wegerecht ergebende Behördenzuständigkeit für die Einziehung von der Flurbereinigung unberührt. Dies ändert indes nichts daran, dass in einem derartigen Fall die Entlassung solcher Wegegrundstücke aus den Bindungen, die der Flurbereinigungsplan für sie als gemeinschaftliche Anlagen (§ 39 FlurbG) vorsieht, nur durch die Gemeinde (vermittels einer Satzung nach § 58 Abs. 4 Satz 2 FlurbG) erfolgen kann. Hierbei hat die Gemeinde die berechtigten Interessen der Teilnehmer der Flurbereinigungsgemeinschaft am Fortbestand der sie begünstigenden Festsetzungen des Flurbereinigungsplans mit den für die Änderung sprechenden öffentlichen oder sonstigen Belangen abzuwägen.“ (BVerwG, 2002)

Aus den genannten Zusammenhängen folgt umgekehrt indessen auch die Pflicht der Flurbereinigungsbehörde, vor allem die Wege als gemeinschaftliche Anlagen durch Festsetzungen im Flurbereinigungsplan nach § 58 Abs. 4 Satz 1 FlurbG zu sichern, wenn die Zuteilung in Eigentum und Unterhaltung gemäß § 42 Abs. 2 FlurbG nicht an die Teilnehmergemeinschaft erfolgt, wie es in Niedersachsen regelmäßig der Fall ist, sondern mit Zustimmung oder nach landesgesetzlichen Vorgaben an einen Anderen, insbesondere die Gemeinde. Bei der Zuteilung an die Gemeinden wird der Weg in der Regel schon im Flurbereinigungsverfahren als Gemeindestraße in Form des öffentlichen Feldwegs nach dem Straßen- und Wegerecht gewidmet, wobei eine Beschränkung auf den land- und forstwirtschaftlichen Verkehr sowie den Anlieger-, Rad- und Fußgängerverkehr typisch ist. In Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Hessen erfolgt stattdessen, wie in den Abschnitten 6.3 bis 6.5 dargelegt, eine Indienststellung als gemeindliche Einrichtung der Daseinsvorsorge.

Nach Beendigung des Flurbereinigungsverfahrens erfordert die Einziehung eines Wegs seitens der

Gemeinde daher zunächst eine Abänderungssatzung nach § 58 Abs. 4 Satz 2 FlurbG zur Aufhebung des flurbereinigungsrechtlichen Sonderregimes, bevor die straßenrechtliche Entwidmung zur Aufhebung der öffentlich-rechtlichen Zweckbindung folgen kann, um den Weg zu beseitigen und die Wegefläche anderweitig zu verwenden. Wie das Verwaltungsgericht (VG) Ansbach im Urteil vom 26.09.2011 darlegt, ist eine straßenrechtliche Entwidmung ohne vorherige Abänderungssatzung nach § 58 Abs. 4 Satz 2 FlurbG rechtswidrig, weil sie gegen geltendes Recht verstößt, und zwar den Regelungen des Flurbereinigungsplanes, die gemäß § 58 Abs. 4 Satz 1 FlurbG die Wirkung von Gemeindegesetzungen haben (VG Ansbach, 2011). Denn eine Abänderung dieser Regelungen ist nach § 58 Abs. 4 Satz 2 FlurbG nur durch eine Satzung der Gemeinde möglich, nicht aber durch eine Entwidmung als straßenrechtlicher Verwaltungsakt.

In Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Hessen kann die Abänderungssatzung nach § 58 Abs. 4 Satz 2 FlurbG natürlich mit der Satzung zur Außerdienststellung des Feldwegs als gemeindliche Einrichtung in einer Einziehungssatzung zusammengefasst werden. In Niedersachsen geht die Herrschaft über die Feldwege vollständig auf die Teilnehmergemeinschaft als Realverband nach Abschluss des Flurbereinigungsverfahrens über, sofern der Flurbereinigungsplan die Regelungen nicht explizit als im gemeinschaftlichen Interesse der Beteiligten oder im öffentlichen Interesse liegend gemäß § 58 Abs. 4 Satz 1 FlurbG ausweist. Sollte dies jedoch der Fall sein, erfordert eine Verfügung durch den Realverband zuvor auch eine gemeindliche Abänderungssatzung nach § 58 Abs. 4 Satz 2 FlurbG.

## 8 Resümee

Wirtschaftswege durchziehen den ländlichen Raum und werden weit über die Land- und Forstwirtschaft hinaus in vielfältiger Weise genutzt. Indessen ändern sich die Nutzungsansprüche im Zuge der Siedlungs- und Kulturlandschaftsentwicklung, was dazu führt, dass insbesondere Feldwege ihre Verkehrsbedeutung verlieren können oder aus überwiegenden Gründen des öffentlichen Wohls weichen müssen.

Wie ein Blick in die Rechtsprechung zeigt, wirft die Einziehung vielfach Probleme auf, wenn es sich um Wege aus Bodenordnungsverfahren handelt, die als gemeinschaftliche Anlagen der ehemaligen Teilnehmer der Neuordnungsverfahren geschaffen wurden.

Der Beitrag skizziert die komplexen Entstehungszusammenhänge und gibt einen Überblick, wie notwendige Einziehungen von Rezess- bzw. Interessenwegen im norddeutschen Rechtskreis (Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und zum Teil Hessen) rechtssicher

durchzuführen sind. Dabei ist mitunter kaum mehr bekanntes Landesrecht des 19. und 20. Jahrhundert zu beachten ist. Die abschließende Betrachtung der neueren Flurbereinigungswege gilt für ganz Deutschland und schafft Klarheit auf diesem schwierigen Rechtsgebiet.

## Literatur/Quellen

- Berkenbusch, F. [1972]:* Die Rechtsgeschichte der Flurbereinigung in Deutschland. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen.
- BGH – Bundesgerichtshof [2008]:* Beschluss vom 13.03.2008, Az.: V ZB 113/07 – In: openJur 2011, 6305.
- Bitterwolf-de Boer, R. und Schaefer, S. [2010]:* Gemeindliche Wirtschaftswege – In: Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft (DLKG), Sonderheft 3, S. 32–40. ISSN: 1614-5240
- BVerwG – Bundesverwaltungsgericht [1976]:* Urteil vom 26.08.1976, Az.: 5 C 41.75 – In: Rechtsprechung zur Flurbereinigung (RzF) 8 zu § 58 Abs. 4 FlurbG.
- BVerwG [2002]:* Urteil vom 18.11.2002, Az.: 9 CN 1.02 – In: RzF 14 zu § 58 Abs. 4 FlurbG.
- BVerwG [2015]:* Urteil vom 09.12.2015, Az.: 9 C 28.14 – In: openJur 2020, 84606.
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall [2016]:* Richtlinien für den Ländlichen Wegebau (RLW), Teil 1: Richtlinien für die Anlage und Dimensionierung Ländlicher Wege. DWA-Regelwerk Arbeitsblatt DWA-A 904-1. ISBN: 978-3-88721-359-6 (Print)
- Herber, F.-R. [2010a]:* Öffentliche Straßen und Privatstraßen – In: Kodal, K. (Hrsg.): Straßenrecht. 7. Auflage, Verlag C. H. Beck, München, S. 211–241. ISBN: 978-3-40652-567-4
- Herber, F.-R. [2010b]:* Widmung – In: Kodal, K. (Hrsg.): Straßenrecht. 7. Auflage, Verlag C. H. Beck, München, S. 297–332. ISBN: 978-3-40652-567-4
- HessStGH – Hessischer Staatsgerichtshof [1966]:* Urteil vom 21.09.1966, Az.: P.St. 387 – In: Staats-Anzeiger für das Land Hessen, Ausgabe 44/1966, S. 1394–1403.
- HessVGH – Hessischer Verwaltungsgerichtshof [1979]:* Beschluss vom 26.06.1979, Az.: II N 10/76 – In: RzF 9 zu § 58 Abs. 4 FlurbG.
- Hunke-Klein, M. [2018]:* Netz kennen – Hilfe bei der Bestandsaufnahme – In: Städte- und Gemeinderat – Die Fachzeitschrift für Kommunal- und Landespolitik in Nordrhein-Westfalen, 72. Jhrg., Heft 7-8, S. 8–10. ISSN: 0342-6106
- Jamin, R. [1985]:* Aufbau, Tätigkeit und Verfahren der Auseinandersetzungsbehörden bei der Durchführung der preußischen Agrarreformen. Dissertation. Rechtshistorische Reihe, Band 39, Peter Lang Verlag, Frankfurt a. M. ISBN: 3-820-48181-8
- Kroeschell, K. [1979]:* Bauernbefreiung und Grundentlastung – In: Agrarrecht, 9. Jhrg., Heft 9, S. 241–248.
- Landtag Rheinland-Pfalz [1995]:* Gesetzentwurf der Landesregierung Aechtes Rechtsbereinigungsgesetz. Drucksache 12/7101 vom 22.08.1995.
- LÖBF – Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten/Landesamt für Agrarordnung Nordrhein-Westfalen [1996]:* 175 Jahre Landeskulturverwaltung – für Mensch und Natur. Eigenverlag, Düsseldorf.
- Nds. OVG – Niedersächsisches Oberverwaltungsgericht [2008]:* Beschluss vom 22.09.2008, Az.: 10 LA 178/07 – In: openJur 2012, 48043.
- Nds. OVG [2016]:* Beschluss vom 30.12.2016, Az.: 10 LA 69/16 – In: Nds. Vorschrifteninformationssystem (NI-VORIS), Entscheidungsdatenbank.
- OLG (Oberlandesgericht) Naumburg [2015]:* Beschluss vom 17.08.2015, Az.: 12 Wx 48/14 – In: openJur 2020, 28306.
- OVG RP – Oberverwaltungsgericht des Landes Rheinland-Pfalz [1975]:* Urteil vom 04.06.1975, Az.: 1 A 128/73 – In: RzF 6 zu § 58 Abs. 4 FlurbG.
- OVG RP [2004]:* Urteil vom 01.04.2004, Az.: 1 C 10464/03.OVG (unveröffentlicht).
- OVG RP [2005]:* Urteil vom 24.11.2005, Az.: 1 C 10760/05.OVG. In: RzF 15 zu § 58 Abs. 4 FlurbG.
- Pannwitz, G. [1957]:* Das Recht der Interessentenschaften. Dissertation. Landschriften-Verlag, Bonn.
- Quadflieg, F. [1967]:* Die Teilnehmergeinschaft nach dem Flurbereinigungsgesetz vom 14. Juli 1953 als Genossenschaft des öffentlichen Rechts. Schriftenreihe für Flurbereinigung, Band 45.
- Schneider, K. H. und Seedorf, H. H. [1989]:* Bauernbefreiung und Agrarreformen in Niedersachsen. Hrsg. von der Niedersächsischen Landeszentrale für politische Bildung, Hannover.
- Schneider, R. [2003]:* Altrechtliche Personenzusammenschlüsse. Dissertation. Rechtshistorische Reihe, Band 267, Peter Lang Verlag, Frankfurt a. M.. ISBN: 3-631-50618-X
- Thiemann, K.-H. [2015]:* Zu den Personenzusammenschlüssen alten Rechts i. S. v. Art. 233 § 10 EGBGB im Beitrittsgebiet. In: Recht der Landwirtschaft, 67 Jhrg., Heft 11, S. 293–296. ISSN: 0486-1469
- Thomas, K. [2016]:* Die Nutzung der Wege der niedersächsischen Realverbände – In: Recht der Landwirtschaft, 66. Jhrg. Heft 10, S. 281–283. ISSN: 0486-1469
- Thomas, K. und Tesmer, G. [2013]:* Niedersächsisches Realverbandsgesetz – Kommentar. 9. Auflage, Kommunal- und Schul-Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8293-1021-5
- VG (Verwaltungsgericht) Ansbach [2011]:* Urteil vom 26.09.2011, Az.: AN 10 K 10.00805 – In: openJur 2012, 117972.
- VG Hannover [2017]:* Urteil vom 22.08.2017, Az.: 1 A 3525/15 – In: openJur 2020, 10189.
- VG Koblenz [2010]:* Urteil vom 06.12.2010, Az.: 4 K 149/10.KO – In: openJur 2020, 22463.

*VG München [2013]:* Urteil vom 16.04.2013, Az.: M 2 K 12.3918 – In: openJur 2014, 4622.

*Weiß, E. [1990]:* Von der Bauernbefreiung zur heutigen ländlichen Bodenordnungsaufgabe – In: Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 21, S. 2–33. ISBN: 3-87819-155-7

*Wingarter, K. und Mayr, C. [2018]:* Flurbereinigungsgesetz – Standardkommentar. 10. Auflage, Agricola-Verlag, Butjadingen-Stollhamm. ISBN: 978-3-920009-83-4

**Anschrift des Verfassers:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Thiemann  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Geodäsie  
85577 Neubiberg  
k-h.thiemann@unibw.de





# Integrating Photogrammetry and Machine Vision – Two Examples of Using Best of Both Worlds

## Abstract

Machine vision has become an integral part of many processes in industry. It is involved in industrial production as it ensures high-quality inspection and enhances automation efficiency, leading to an improved product consistency, a reduced number of defects, and an increased operational productivity. Yet, the applications are by far not limited to static camera setups. Exploring, mapping and analyzing indoor environments like in typical SLAM (simultaneous localization and mapping) applications have become part of industrial vision (e.g.) in the context of autonomous logistics and delivering. This paper explores the benefits of incorporating photogrammetric models, uncertainties, and error propagation into machine vision. We exemplify this by two different lines of research. First, a classical SLAM approach is extended by new camera models, tracking methods, and loop closure detection developed in photogrammetric computer vision. Then, a second line of research is sketched by addressing uncertainty in industrial vision, for decision-making in safety-critical applications.

**Keywords:** Machine Vision, Uncertainty Quantification, Photogrammetry, Deep Learning, Robotics

## 1 Outline

This paper explores the benefits of incorporating photogrammetric models, uncertainties, and error propagation into machine vision. We exemplify this by two different lines of research. In Section 2, a classical SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) approach is extended by new camera models, tracking methods and loop closure detection developed in photogrammetric computer vision. Afterwards, in Section 3, a second line of research is sketched by addressing uncertainty in industrial vision, for decision-making in safety-critical applications. In Section 4, we summarize and highlight the benefits of integrating the different aspects.

## 2 “Fish-Eyed” MultiCol-SLAM

The accurate reconstruction of an observed scene from sets of ordered images has a long history in aerial and close-range photogrammetry. Usually, the object and reconstruction setup is well defined and the scene observations using high-resolution cameras are well planned. Thus, the connectivity between multiple camera positions is known or easily established and off-line bundle adjustment over the cameras and scene structure is performed yielding accurate results. In addition, initial values for the exterior and interior camera orientations are mostly available from external

sensors, ground control points, and accurate calibration. In the computer vision community, the direction of research is called SfM (Structure from Motion) and relaxes many constraints about scene and camera geometry that are assumed in classical photogrammetry. Advances in projective geometry and visual feature research enabled the off-line reconstruction of large scenes from unordered sets of images and photo collections. But essentially, the SfM methods solve the exact same problem as in aerial and (close-range) photogrammetry, i.e. reconstruction of scene and cameras. The main difference lies in the initialization of the bundle adjustment through direct relative orientation methods for calibrated (Stewenius et al., 2006, Hartley and Zisserman, 2008, Kneip et al., 2012) or uncalibrated (Barreto and Daniilidis, 2005, Kukulova et al., 2015) cameras and a simultaneous connectivity estimation using only natural image features. The scene is basically assumed to be static and the reconstruction is done off-line doing batch optimization over the entire scene. Hence, correspondence information (features) can be exhaustively extracted and matched a-priori and has no temporal coherence. Thus, SLAM methods, which solve basically the same geometric problem, come into play, when real-time challenges (e.g.) using live videos need to be solved. These methods estimate the sensor pose from continuous sensor updates (live video). Basically two streams emerged from this line of research, namely filter- and keyframe-based SLAM techniques. The basic idea behind both approaches is that not all poses, observations, and uncertainties from a continuous

video stream can (and need to) be integrated into the solution of the SLAM problem, see Figure 1. Outstanding work of (Dellaert and Kaess, 2006; Strasdat et al., 2012) give a detailed analysis of both methods and close the gap between SLAM, SfM, and classical bundle adjustment by generalization of the entire reconstruction problem using graphical models.

In the following we outline a SLAM approach that incorporates thorough geometric modelling and error propagation as used in classical photogrammetry into a highly efficient mapping and pose estimation framework. The performance evaluation as well as the remarkably wide use in the community underlines that the whole system benefits from those different components. More details regarding the involved methods and models can be found in (Urban et al. 2013, 2015, 2016, 2017a, 2017b; Urban and Hinz, 2016)

## 2.1 MultiCol-SLAM framework – overview

The basic structure of our system is built upon ORB-SLAM (Mur-Artal and Tardos, 2014, 2016). We extend ORB-SLAM to multi-fisheye camera systems using MultiCol (Urban et al., 2017a). Our contributions are the following:

- The introduction of Multi-Keyframes (MKFs).
- A hyper-graph formulation of MultiCol.
- Multi-camera loop closing.
- Minimal non-central absolute pose estimation methods for re-localization (Kneip et al., 2013).
- Different initialization method, based on the essential matrix.

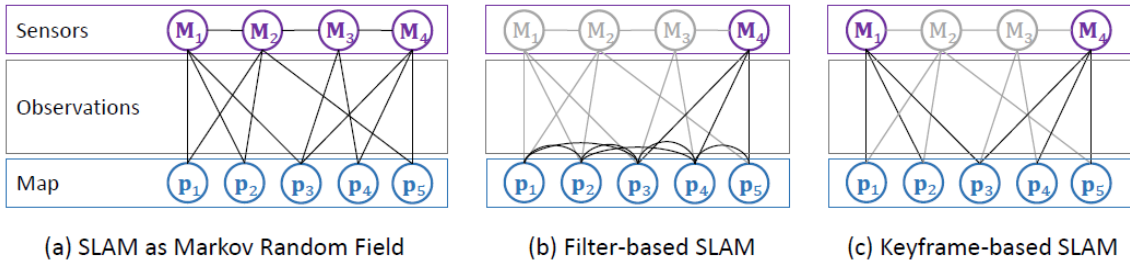
The proposed tracking and mapping system is dubbed MultiCol-SLAM. Figure 2 depicts an overview of the system. In general, it is divided into multiple threads running in parallel and taking care of different aspects. For the sake of clarity, the loop detection thread is omitted in this figure. Two of the most profound adjustments in MultiCol-SLAM compared to ORB-SLAM are the introduction of Multi-Keyframes (MKFs), i.e. a keyframe consists of multiple images and the use of fisheye cameras. With view on photogrammetric tasks, both novelties involve some significant changes to the basic design, e.g. bundle adjustment, pose estimation, map point triangulation, and relative orientation computation. With every new set of incoming camera images, the tracking thread extracts point features from every image. Then, they are stored in a continuous vector, that will later be used to identify and match points across MKFs and mask outliers. To ensure a fast indexing and querying of feature to camera mappings, we use hash maps that provide constant time  $O(1)$  search. Like ORB-SLAM, we use the relative orientation between the last two frames to predict the current position of the system. The local

map points are projected to the MCS and matched to the extracted features from the current frame. If enough matches are retained from the set of putative correspondences after an initial robust pose optimization using MultiCol, the tracking thread starts to search for more matches, assigns the reference MKF and decides if a new MKF should be added and passed over to the mapping thread. If the initial pose estimation fails, GP3P (Kneip et al., 2013) and RANSAC are used to perform re-localization of the MKS using the map points assigned to a set of recent MKFs. Each time the tracking thread passes a new MKF to the mapping thread, recently created map points that do not fulfill certain conditions are deleted from the map. Then, new map points are triangulated over MKFs that are in the vicinity of the added MKF. Here, the vicinity is determined by the co-visibility graph. In contrast to ORB-SLAM, where features are only triangulated between images of the same camera, the reconstruction is now performed over images of different cameras as well. Subsequently, local bundle adjustment is performed to adjust the poses of the MKFs that are part of the local map, as well as all map points. In addition, the mapping thread decides which MKFs are redundant and deletes them from the map.

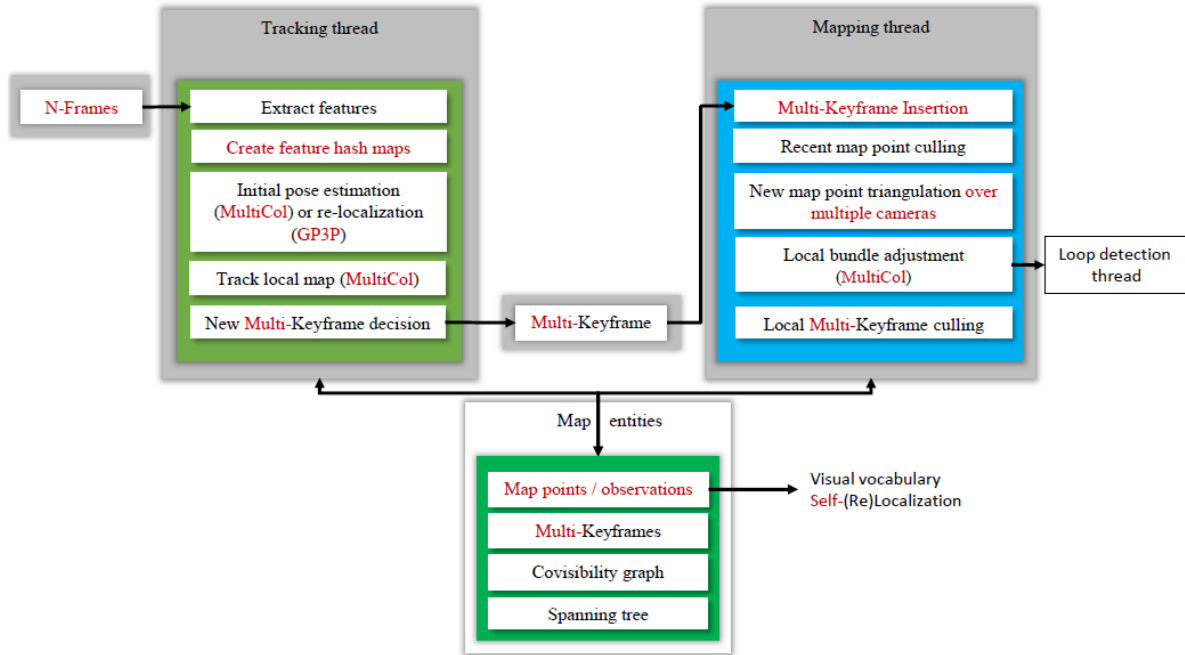
The loop detection and closing operations are compiled in Figure 3. This thread searches for potential loop closures with every new MKF that is added. To decide if a place was already visited before and to identify MKFs as loop candidates, the system uses a Bag-of-Binary-Words framework (Galvez-Lopez and Tardos, 2012). If a loop is detected, the essential graph (a sparse version of the co-visibility graph) is optimized (cf. Figure 4). To correct for the scale-drift, the optimization is carried out over similarity transformations that connect the MKFs. The difference to ORB-SLAM is how we model the tracking and mapping pipeline. As multiple cameras observe the scene from each pose (Figure 1) and also one map point can be observed by multiple cameras at the same time, the graph cannot be represented by binary edges anymore (edges that connect two vertexes). Instead, we extend the graph to a hyper graph that we used to model MultiCol where edges can connect to an arbitrary number of vertexes.

## 2.2 MultiCol-SLAM: Results and performance

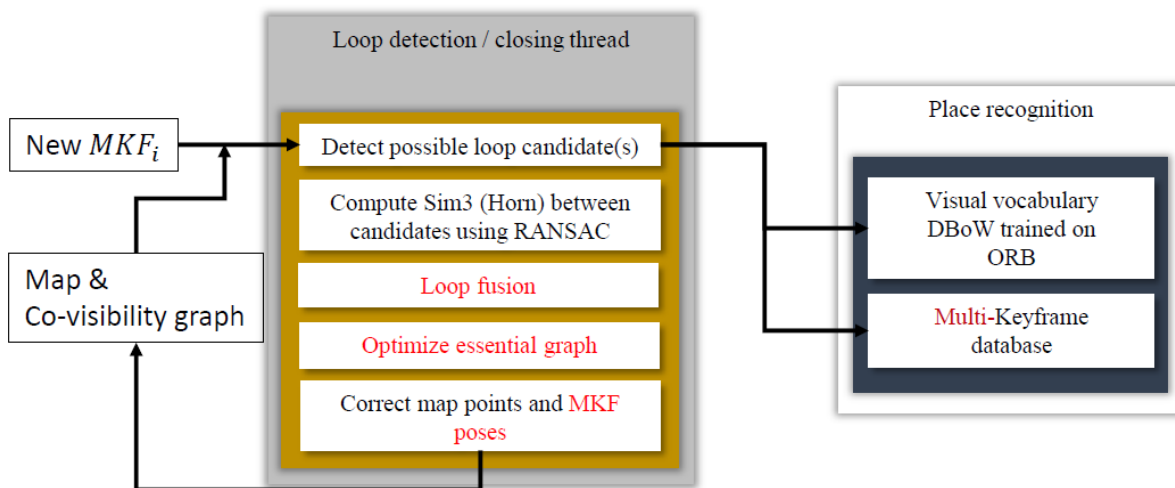
To analyze the performance of the presented MCS SLAM, various tests are performed. One example is visualized in Figure 4. More information about the dataset can be found on (Urban and Jutzi, 2016).



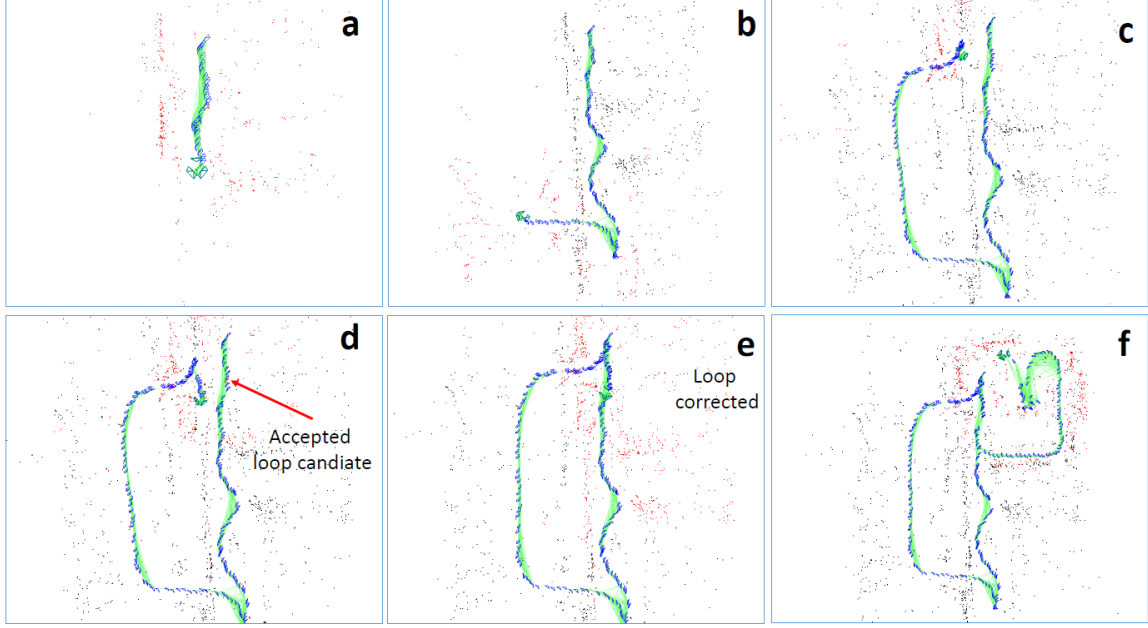
**Figure 1:** (a) SLAM as a Markov random field. (b) The graph is sparsified by marginalization of past poses except the current one from the graph. (c) Only keyframes are selected and all other poses, observations, and object points that are not visible in any retained keyframes are removed.



**Figure 2:** The MultiCol-SLAM framework (without loop closing thread). Red text depicts the modules where significant photogrammetric input was included into ORB-SLAM.



**Figure 3:** Loop detection and correction. It extends Figure 2. Each time a new MKF is inserted, the loop detection thread tries to detect possible loop candidates from the MKF database. First, a BoW score  $s_{min}$  is computed for all frames that are connected to the new MKF in the co-visibility graph. Then, the MKF database is queried and only MKFs with a score higher than  $s_{min}$  are declared as candidates for loop detection. The right part shows the two components of the place recognition class.



**Figure 4:** SLAM with loop closure. (a-b) trajectory and map is built. The green lines represent the co-visibility graph edges with high weight. Blue pyramids depict MKF. Red map points represent the active map, black points are all map points. c) Visually the trajectory crossed itself. However, no loop is detected. Although candidates exist, RANSAC does not find a good solution, because the reconstructed geometry is still too different. d) a loop candidate is accepted. e) The corrected loop after the optimization of the essential graph. f) tracking continues using the active map. New MKFs are only created if the baseline is large enough or too few points are tracked.

The first metric for numerical evaluation is the ATE and estimates the root mean squared translation differences between both trajectories. In order to calculate the absolute error, the two trajectories need to be aligned in advance using a similarity transformation  $S$ . For  $N$  pose pairs, ATE can then be calculated as:

$$\begin{aligned} \text{ATE} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|\text{trans}(\mathbf{M}_t^{rel})\|^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|\text{trans}(\mathbf{M}_t^{gt-1} \mathbf{S} \mathbf{M}_t)\|^2} \end{aligned}$$

The second metric is called RPE and allows to evaluate the local accuracy and drift of the trajectory over some time interval  $\Delta$ . Thus, we can calculate  $M = N - \Delta$  relative orientation errors along the trajectory. The RPE at time step  $t$  can be defined by:

$$\text{RPE}(\Delta) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{t=1}^M \|\text{trans}(\mathbf{M}_t^{rel})\|^2}$$

In the case of ATE only the translation is evaluated. For the relative error, we can also evaluate the rotational accuracy. This is done by replacing the “trans” with a function that returns the Rodriguez vector of the rotation matrix  $M$ .

Each trajectory is evaluated five times, i.e. the SLAM algorithms are used five times to estimate the camera

trajectory. All accuracies and run-times are calculated as the median value over the five runs.

First, we align the KFs or MKFs respectively, by estimating a similarity transformation between ground truth and SLAM trajectory. Then, the ATE is evaluated for all trajectories. The results are depicted in Table 1a. Obviously, MultiCol-SLAM significantly outperforms its single camera pendant in terms of Keyframe accuracy. One explanation of the large performance gap is the simple initialization of the single camera SLAM. To get a measure of the local accuracy, we also estimate the RPE for all trajectories and all poses by setting  $\Delta = 1$ . The trajectories do not need to be aligned in this case. The accuracies for translation and rotation are depicted in Table 1b. Still, using multi-cameras yields a better performance, especially for the translation. The rotational components show a similar trend, but the differences are less prominent. The rotational accuracy for the two lasertracker trajectories is a lot better because the trajectory has only little rotation of the camera system about the up-axis. On average the rotational accuracy of the MCS is about 0.5-1.5° and the translational component, depending on the walking speed and scene between 1.0-2.5 cm.

The source code of this system can be found at GitHub: <https://github.com/urbste/MultiCol-SLAM>. By the time of writing this article, the work got more than 600 stars and 220 forks.

	Single fisheye camera	Multi-fisheye camera system
	[cm]	[cm]
Laser 1	31.0	1.4
Laser 2 fast	28.1	5.3
Indoor 1 stat. env.	32.4	2.1
Indoor 2 dyn. env.	13.3	1.8
Outdoor 1 dyn. env.	(X)	3.6

(a) ATE

	Single fisheye camera	Multi-fisheye camera system
	[cm]/[deg]	[cm]/[deg]
Laser 1	1.95/0.32	1.2/0.33
Laser 2 fast	2.6/0.31	2.7/0.56
Indoor 1 stat. env.	2.8/1.72	1.1/1.54
Indoor 2 dyn. env.	2.8/2.04	1.1/1.78
Outdoor 1 dyn. env.	(X)	2.3/1.28

(b) RPE

**Table 1:** (a) Median KF and MKF ATEs for single and multi-camera SLAM respectively. The translational accuracy was calculated after 7DoF alignment between ground truth and estimated frames. (b) RPE for single and multi-fisheye camera SLAM. Here we set  $\Delta = 1$ , i.e. the frame two frame tracking accuracy is estimated. (X) means that tracking failed at some point and a significant part of the trajectory was not tracked.

### 3 Uncertainties in machine vision

Machine Vision has become indispensable in manufacturing, driven by the growing demand for precise and efficient quality inspection, documentation, and product traceability. This technology encompasses engineering systems, such as machines or production lines, that execute quality inspections to discard defective products or manage machines in various capacities, like guiding robots during product assembly (Steger et al., 2018). Common tasks that are solved in machine vision systems are object identification, position detection, completeness checking, shape and dimensional inspection, or surface inspection (Fraunhofer Allianz Vision, 2003). Typical requirements for machine vision applications are high accuracy, real-time processing, robustness to environmental changes, and the ability to handle diverse object appearances.

Uncertainty in machine vision systems can be caused, for example, by sensor noise, by model or data limitations, or by a changing environment. Quantifying and managing the uncertainty is important in many machine vision applications for several reasons. Firstly, knowing the uncertainty of the results can help to make more informed decisions. In autonomous driving, for example, the uncertainty of the detected objects can be used to decide whether to proceed or chose a safer action. Other safety-critical applications, such as medical imaging or industrial

automation, benefit from the knowledge of uncertainty by preventing errors that might lead to misdiagnoses or damages. Secondly, explicitly modelling or propagating uncertainty information can result in an increased robustness and/or accuracy of the results. And thirdly, returning the uncertainty together with the results can increase user trust and transparency as users can better understand the limitations and confidence levels of a black-box system.

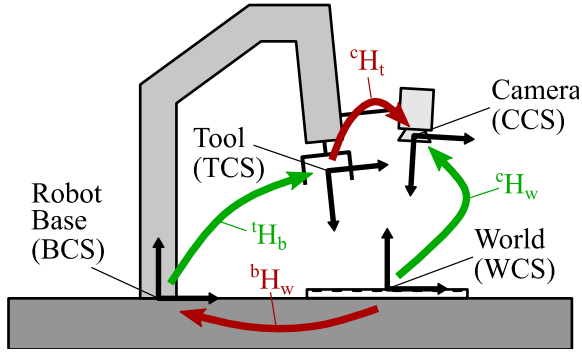
The intersection of machine vision and photogrammetry presents a unique opportunity to address, mitigate, or exploit uncertainty. Machine vision can help increase efficiency, reliability, and flexibility of photogrammetric methods while the rigorous methodologies of photogrammetry can provide machine vision systems with established frameworks that combine highest measurement accuracy with error quantification, error correction, and statistically sound decision making. This synergy, not only but especially in the context of deep learning (DL), can pave the way for new applications and improved performance in various domains, from industrial automation over autonomous driving to remote sensing.

In this section, we will demonstrate the benefits of incorporating uncertainties through four examples in the field of machine vision. The first example focuses on a rule-based approach for hand-eye calibration of industrial robots. The remaining three examples utilize deep learning techniques and cover DL-based image segmentation, DL-based regression, and neural network calibration.

#### 3.1 Hand-Eye calibration

This section essentially summarizes parts of the work of Ulrich and Hillemann (2024).

In industrial automation, accurate hand-eye calibration is crucial for applications with vision-guided robots that use cameras to guide the robot’s movements. The objective of the calibration is to determine the pose (i.e., 3D rigid transformation) of the robot tool coordinate system (TCS) with respect to the camera coordinate system (CCS) (see Figure 5). This pose is required to transform measurements that are obtained in the CCS to the robot base coordinate system (BCS), in which they are expected by the robot controller to execute a manipulation task. While modern industrial robots exhibit a high repeatability, their absolute accuracy is generally much lower. Most traditional approaches for hand-eye calibration ignore the robot’s uncertainty, which degrades the results (Ulrich and Hillemann, 2024).



**Figure 5:** Coordinate systems and transformations that are relevant for hand-eye calibration. A camera (eye) is rigidly attached to the robot's end effector (hand). Known or observed transformations are displayed in green, unknown transformations in red. Adapted from Ulrich and Hillemann (2024).

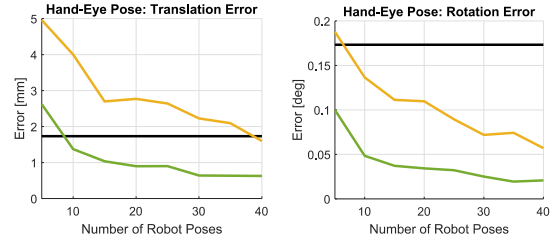
For hand-eye calibration, the robot is moved to  $n_r$  different poses and an image of a calibration plate, which defines the world coordinate system (WCS), is acquired at each pose. Let  ${}^t\mathbf{H}_{b,j}$  be the robot pose (represented as a homogeneous transformation matrix) that is queried from the robot controller at pose  $j$  ( $j = 1, \dots, n_r$ ). This matrix transforms points from the BCS into the TCS. The hand-eye calibration then optimizes the six pose parameters of the unknown hand-eye pose  ${}^c\mathbf{H}_t$  and that of the unknown pose  ${}^b\mathbf{H}_w$  by minimizing the reprojection error of the  $n_w$  points  $\mathbf{p}_k$  ( $k = 1, \dots, n_w$ ) of the calibration plate that are projected to the 2D image points  $\mathbf{p}_{j,k}$ :

$$\mathbf{p}_{j,k} = \pi({}^c\mathbf{H}_t {}^t\mathbf{H}_{b,j} {}^b\mathbf{H}_{w,j} \mathbf{p}_k, \mathbf{i})$$

Here,  $\pi(\mathbf{p}_c, \mathbf{i})$  is the projection of the point  $\mathbf{p}_c$ , which is given in the CCS, into the image by using the parameters of the inner orientation  $\mathbf{i}$ .

The optimization can be performed in the Gauss-Markov model, where the observations are the 2D image points  $\mathbf{p}_{j,k}$  and the unknowns are the six pose parameters of  ${}^c\mathbf{H}_t$  and  ${}^b\mathbf{H}_w$  respectively. Note that this approach implicitly assumes error-free robot poses. To model the uncertainty of the robot, we must introduce the  $6n_r$  parameters of the robot poses  ${}^t\mathbf{H}_{b,j}$  as additional observations. Consequently, the observations can no longer be expressed as an explicit function of the unknowns. This requires to perform the optimization in the Gauss-Helmert model. Furthermore, for the stochastic model, a variance component estimation must be performed because by introducing the robot poses as observation, three different groups of observations need to be considered separately: the image point coordinates, the

translation parameters of the robot poses, and the rotation parameters of the robot poses. The variance component estimation yields three individual variance factors after convergence of the optimization. They inform us not only about the accuracy of the extracted image points but also about the accuracy of the used robot. Furthermore, by explicitly modelling the uncertainty of robot, the accuracy of the estimated hand-eye pose is increased. Figure 6 shows the evaluation results based on simulated data. The errors of the translation and rotation part of the resulting hand-eye poses are plotted against the number of robot poses that were used for calibration, clearly showing the advantage of modelling the uncertainty of the robot



**Figure 6:** Translation and rotation error of the hand-eye calibration for the estimation with (green) and without (yellow) modelling the robot's uncertainty. The horizontal black line visualizes the uncertainty of the simulated robot. Adapted from Ulrich and Hillemann (2024).

### 3.2 DL-based image segmentation

In recent years, deep neural networks have significantly advanced the fields of computer vision, photogrammetry, and machine vision in various applications. Nevertheless, the networks often lack interpretability and tend to be overconfident, which still prevents their use in several applications. The uncertainty of deep learning results provides information about the reliability and confidence of the predictions of the model, which is essential for making well-founded decisions especially in safety-critical applications. But uncertainties can also help to identify limitations of the network and provide the basis for optimizations of the network architecture or the training process, thus increasing the robustness and trustworthiness of the system.

The topic of quantifying the predictive uncertainty of deep neural networks has been addressed in several publications. Three of the most prominent methods are Bayesian Neural Networks (MacKay, 1992), Monte Carlo Dropout (Gal and Ghahramani, 2016), and Deep Ensembles (Lakshminarayanan et al., 2017).

Deep Ensembles can be considered state-of-the-art in uncertainty quantification as they are able to capture the predictive uncertainty, i.e., both aleatoric (data-related) and epistemic (model-related) uncertainties. Aleatoric uncertainty arises from noise in the data, while epistemic uncertainty stems from the model’s lack of knowledge. By addressing both types of uncertainty, deep ensembles offer a more complete picture of the model’s confidence. The predictive uncertainty is computed by training multiple networks independently with different initializations and possibly different data subsets. During inference, each model in the ensemble makes a prediction. These predictions are then combined, typically by averaging, to produce the final result. The variability of the predictions from different models is used to estimate uncertainty. Unfortunately, there is one major disadvantage to these approaches: During runtime, several nets (e.g., 10) have to be stored and executed for inference. This prevents their use in resource- and time-critical applications.

### 3.2.1 Efficient uncertainty distillation

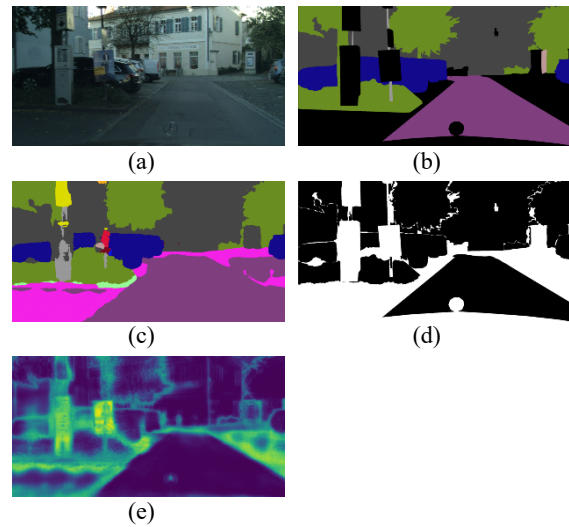
The content of this section essentially summarizes parts of the work of Landgraf et al. (2024a).

To overcome the disadvantages of deep ensembles, Landgraf et al. (2024a) introduce deep uncertainty distillation using ensembles for semantic segmentation (DUDES). Their approach uses student-teacher distillation: First, a deep ensemble is trained with the training dataset. The deep ensemble acts as the teacher in the student-teacher distillation. Then, a student is trained, which essentially has the same architecture as each member of the ensemble. However, in addition to the segmentation head that provides the segmentation result, the student also contains an uncertainty head that predicts the pixel-wise uncertainty map of the segmentation. While the segmentation head uses a softmax activation to obtain class-wise probabilities, the uncertainty head uses a sigmoid activation for the uncertainties. The loss function that is used to train the student consists of two components: The first component is applied to the segmentation head and is the well-known categorical cross-entropy loss. For this loss component, the ground truth labels of the training dataset are used. The second loss component is applied to the uncertainty head to distill the predictive uncertainties of the teacher into the student. It computes the root mean squared logarithmic error between the ground truth uncertainty obtained by the teacher and the student’s predicted uncertainty for each pixel. After the training, the teacher is no longer needed and can

be discarded. During inference time, only the student network must be kept in memory and only one single forward pass is necessary to compute both the image segmentation and its uncertainty.

The performance of DUDES was evaluated through extensive experiments, focusing on its ability to identify misclassified pixels and out-of-domain samples. The results demonstrate that DUDES not only provides accurate uncertainty information but also maintains the overall performance of the semantic segmentation task of the teacher. In one experiment, the mean inference times over 25 forward passes were compared: for a single ensemble member it was 18.3 ms and for the teacher with ten ensemble members it was 217.1 ms. The student provided a segmentation and uncertainty quality that was equivalent to that of the teacher, but in only 18.5 ms.

In Figure 7, an example of the Cityscapes (Cordts et al., 2016) validation set is shown. The student’s uncertainty predictions reliably and consistently return high values for wrong predictions and out-of-domain classes.



**Figure 7:** Example image from the Cityscapes validation set (a) with corresponding ground truth labels (b), the student’s segmentation prediction (c), a binary accuracy map (d), and the student’s uncertainty prediction (brighter pixels represent higher uncertainty values). White pixels in the binary accuracy map indicate either incorrect predictions or out-of-domain classes. Adapted from Landgraf et al. (2024a).

To summarize, DUDES provides efficient and reliable uncertainty quantification for DL-based segmentation, which is easy to implement and straightforward to train while having negligible computing overhead. It allows to detect unreliable results that are for example caused by image noise, occlusions, model deficiencies, or even out-of-

domain situations. This facilitates the use of DL-based image segmentation even for safety-critical machine vision applications with high demands on the runtime.

### 3.2.2 Use of uncertainties to improve training

The content of this section essentially summarizes parts of the work of Landgraf et al. (2024b).

In addition to the advantages of uncertainties in segmentation tasks mentioned in the previous section, uncertainties can also be incorporated into the training process to enhance segmentation quality. This is achieved by using an Uncertainty-aware Cross-Entropy loss (U-CE) during training. For this, the regular training process of a semantic segmentation network is adapted by two simple yet effective modifications: Firstly, already during training, the predictive uncertainties are computed alongside the regular segmentation prediction. Secondly, the uncertainties are used to apply a pixel-wise weighting to the regular cross-entropy loss. The idea is similar to that of the focal loss (Lin et al., 2017), which downweights the contribution of easy examples to shift the training focus more towards hard examples or to that of hard example mining (Shrivastava et al., 2016), where training is restricted to hard examples that are automatically detected. Both methods have been successfully applied for semantic segmentation (Jadon, 2020; Wang et al., 2022). In contrast to the existing literature, U-CE uses the predictive uncertainties dynamically during the training to guide the optimization process. This results in a more effective training, better segmentation results, and trained models that are capable of predicting meaningful uncertainties.

To apply the U-CE, the uncertainties are predicted during training by using Monte Carlo Dropout (Gal and Ghahramani, 2016) because it is computationally more efficient than deep ensembles. At each training step, the predictive uncertainty  $\sigma_n$  is computed for each pixel  $n$  by applying multiple sampling iterations. The pixel-wise uncertainty is transferred to a pixel-wise uncertainty weight by

$$w_n = (1 + \sigma_n)^\alpha,$$

where  $\alpha$  controls the strength of the weighting. The uncertainty-aware cross-entropy loss for an image is then computed as

$$L_{U-CE} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_n \sum_{c=1}^C y_{n,c} \log p_{n,c},$$

where  $N$  is the number of pixels in the image,  $C$  is the number of classes,  $y_{n,c}$  is the ground truth label, and  $p_{n,c}$  is the respective softmax output. Table 2 shows

one example of the benefit of U-CE over the conventional cross-entropy loss and the focal loss (Lin et al., 2017) when training a ResNet-101 on Cityscapes for 200 epochs.

Dropout	FL	CE	U-CE
0%	73.1	<b>74.6</b>	
20%	72.6	74.6	<b>76.6</b>
40%	71.2	74.7	<b>75.8</b>

**Table 2:** mIoU values in % for Cityscapes (Cordts et al., 2016) dataset after 200 training epochs of a ResNet-101 backbone for different dropout rates when applying focal loss (FL), conventional cross-entropy loss (CE), and uncertainty-aware cross-entropy loss (U-CE) with  $\alpha = 10$ .

Consequently, using uncertainty already within the training process is beneficial and either yields better segmentation results after a certain number of training iterations or reaches a certain performance level with fewer training iterations.

## 3.3 DL-based regression

### 3.3.1 Uncertainties in 6D object pose estimation

The content of this section essentially summarizes parts of the work of Wursthorn et al. (2024).

Determining the 6D pose of an object, i.e., its 3D orientation and 3D position, from a camera image or from depth sensor data is a fundamental task in computer vision and machine vision. Knowing the 6D object pose is essential, for example, in bin-picking or other robot manipulation applications (Steger et al., 2018; Ulrich and Hillemann, 2024). The currently best performing approaches for 6D object pose estimation are based on deep-learning (Sundermeyer, 2023).

Furthermore, in many machine vision applications, the uncertainty of the estimated object pose is important. Imagine a robot tasked with picking up a cup using an RGB(-D) input image, in which the cup's handle is occluded. This results in an ambiguous pose estimate. If the robot attempts to grasp the cup based on this estimate, it could damage either the cup or itself. By incorporating a measure of pose uncertainty, the robot can detect this scenario and avoid it by selecting a different camera angle or, in a bin picking application, choosing another object instance with a less uncertain pose. Deep ensembles perform best at uncertainty quantification and are more robust under data shift, compared to dropout methods, post-hoc calibration by temperature scaling, and methods motivated by Bayesian inference (Ovadia et al., 2019).

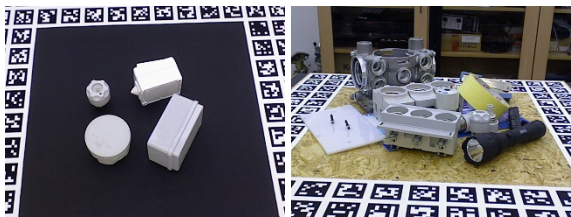


Applying uncertainty quantification methods to multi-stage 6D object pose estimation is challenging because these methods are typically designed for single-stage tasks like segmentation or classification. 6D object poses involve both orientation and position, which are often handled separately. While object positions can be assumed to follow a normal distribution, modelling orientations is more complex.

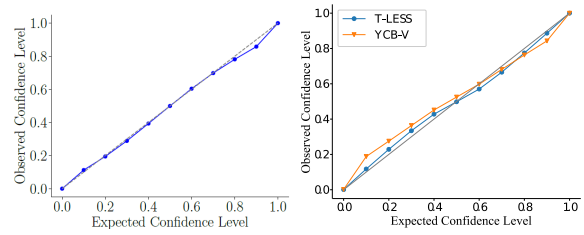
Wursthorn et al. (2024) introduce a method to quantify uncertainty in multi-stage 6D object pose estimation using deep ensembles. The implementation uses SurfEmb (Haugaard and Buch, 2022), a leading 6D object pose estimation method. SurfEmb, which is a multi-stage 6D object pose estimation approach, uses 2D detections from CosyPose (Labbé, 2020) with Mask R-CNN (He, 2017) and trains a neural network to predict 2D–3D correspondences. These are processed by a *PnP* algorithm to estimate object poses. SurfEmb learns dense 2D–3D correspondences using 12-dimensional embeddings, trained self-supervised with a contrastive loss. The ensemble consists of 10 independent models, each generating pose estimates.

To evaluate the quality of the predicted uncertainty, Wursthorn et al. (2024) propose the uncertainty calibration score (UCS). Since the ground truth uncertainties are unknown, it statistically compares the computed uncertainties with the errors in the pose predictions and maps the uncertainty quality to the interval  $[0,1]$  for intuitive interpretation.

Experiments were conducted on the T-LESS (Hodaň et al., 2017) and YCB-V (Xiang, 2018) datasets, both part of the BOP challenge. T-LESS includes 30 largely textureless, often symmetric industrial parts, while YCB-V contains 21 everyday objects. Both datasets feature CAD models and photorealistic rendered training images of cluttered scenes. The T-LESS test dataset comprises 20 cluttered scenes with 50 real test images each. Figure 8 shows two example images. The experiments showed that by using the ensemble, the accuracy of the 6D object poses (averaged over the ensemble members) is at least equivalent but in most cases even better in comparison to the poses obtained from a single network.



**Figure 8:** Two example images from different scenes of the T-LESS dataset (Hodaň et al., 2017) that were used for evaluation.



**Figure 9:** Performance of deep ensembles for 6D object pose estimation. Reliability diagrams for the 12D embedding space of SurfEmb on T-LESS (left plot) and for the computed 3D orientation on T-LESS and YCB-V (right plot). The perfect calibration is represented by the dashed gray line. Adapted from Wursthorn et al. (2024).

Figure 9 shows the result of the evaluation of the standard deviations obtained from the ensemble in form of reliability diagrams, which plot the observed confidence over the expected confidence (Kuleshov, 2018). If the standard deviations were correct, the curve would be an identity line. It can be seen that the standard deviations for the 12D embedding space are very well calibrated, i.e., the ensemble returns accurate standard deviations, which is also reflected in the high UCS value of 0.96. After applying *PnP* the reliability diagrams can be plotted for the 6D poses. The right plot of Figure 9 exemplarily shows the curves for the elements of the rotation matrix for the two datasets. The ensemble again returns accurate standard deviations with UCS values of 0.89 for T-LESS and 0.81 for YCB-V. Unfortunately, the quality of the uncertainties obviously depends on the chosen rotation parameterization, which can be seen from the UCS values, for example, for T-LESS ranging from 0.77 for quaternion representation to 0.91 for Rodriguez. The translation components seem to be less well-calibrated, yielding an UCS value of only 0.65 for T-LESS, for example. A detailed analysis of the causes for this is subject for future work.

### 3.3.2 Uncertainties in novel view synthesis

The content of this section essentially summarizes parts of the work of Hillemann et al. (2024).

Neural Radiance Fields (NeRFs) (Mildenhall et al., 2020) have emerged as a rapidly expanding area of research. By utilizing a set of oriented images, NeRFs enable the creation of novel views of a learned 3D scene with remarkable realism. In industrial contexts, these novel views can be leveraged to efficiently produce photorealistic training images for deep-learning-based methods, such as 6D object pose estimation in bin-picking applications or image-based anomaly detection.

Hillemann et al. (2024) investigate the quality of the generated novel views for industrial applications by

comparing them to ground truth images. For this, three test objects (see Figure 10) were selected with characteristics that are typical for industry (e.g., poor texture, partly reflective surface, fine structures, partly transparent surface). Because of the importance of the knowledge of uncertainty in machine vision applications, they additionally tested whether ensembles methods are able to predict the quality of the novel views without needing a ground truth image.



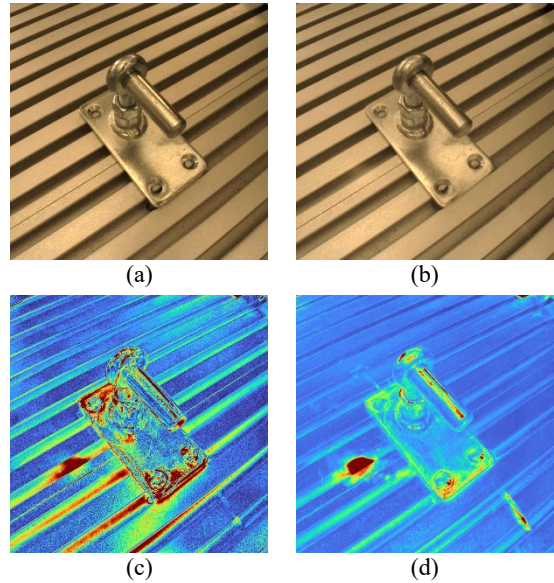
**Figure 10:** Example images of test objects. Reproduced from Hillemann et al. (2024).

To compute the uncertainty of the generated novel views, an ensemble of Nerfacto (Tancik et al., 2023) was trained. Nerfacto is the standard method of Nerfstudio (Tancik et al., 2023) and is a representative of the NeRF methods with short training times, which is essential for many machine vision applications. Each ensemble member was randomly initialized prior to training. Again, the uncertainty is expressed as the standard deviation of the individual predictions.

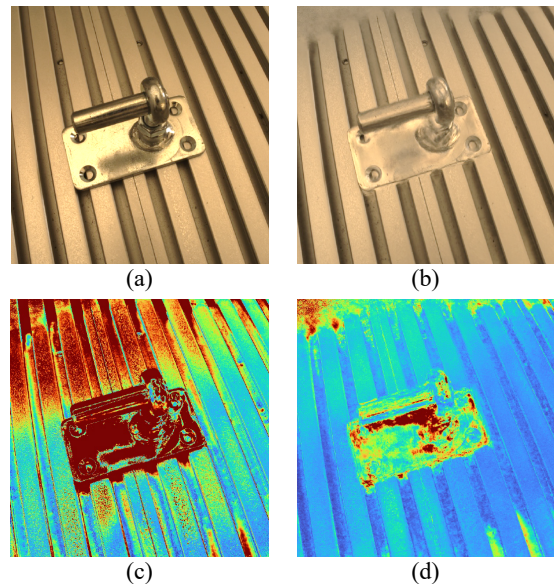
In an in-distribution experiment, 30 ensemble members were trained independently using 100 regularly distributed images. The evaluation images were located between the training views. One example image is shown in Figure 11. The ensemble’s prediction captures the shape well but lacks detail in color, resulting in a smoothed appearance. This is also evident in the grainy residuals, indicating the default Nerfacto model’s limited capacity. The residuals in the predictions correlate with the predicted standard deviation to some extent. For instance, the less pronounced specular reflection on the cylinder’s edge results in large residuals and high standard deviation. Another high standard deviation area left to the object is caused by an outlier prediction of one ensemble member. However, it is also apparent that the predicted standard deviation is often too low in areas with large residuals, like in the background, indicating over-confidence of the ensemble.

In an out-of-distribution experiment, training views with cameras positioned on one quarter of a sphere were used to evaluate the ensemble’s performance with out-of-distribution samples. Ten ensemble members were trained with slightly different subsets of 50 views each. The evaluation images were acquired with a camera on the opposite quarter of the sphere. One example image is shown in Figure 12.

Remarkably, the prediction captures the general shape and color of the scene, but shows artifacts and lacks detail in unobserved areas. View-dependent effects, like specular reflection, cause large residuals that are not reflected in the standard deviation.



**Figure 11:** In-distribution experiment. The ground truth (a), the ensemble prediction (b), the magnitude of the residuals (c), i.e., the difference between (a) and (b), and the predicted uncertainty, i.e., the ensemble standard deviation (d). Adapted from Hillemann et al. (2024).



**Figure 12:** Out-of-distribution experiment (see caption of Figure 11). Reproduced from Hillemann et al. (2024).

In summary, the uncertainty of the generated images in the in-distribution case can be at least qualitatively well covered by the ensemble, although it is partially underestimated. However, some effects, such as specular reflections in out-of-distribution views, obviously cannot be captured by the standard deviation of the ensemble.

### 3.4 Neural network calibration

The content of this section essentially summarizes parts of the work of Wolf et al. (2024).

As demonstrated in previous sections, uncertainties of deep neural network predictions can be computed and are helpful especially in safety-critical applications. However, in some cases, the uncertainties are not perfectly calibrated, i.e., they lack the correct scaling or do not reflect all types of errors. However, calibrated uncertainties are crucial in some applications like sensor fusion. When processing multiple independent sensor inputs with neural networks, incorporating prediction uncertainties in the fusion of features is essential for achieving the most reliable output.

To quantify the calibration quality, calibration metrics like the expected calibration error (ECE) (Naeini, 2015), the uncertainty calibration error (UCE) (Naeini, 2015), the uncertainty calibration score (UCS) (Wursthorn et al., 2024), or the area under the sparsification error (AUSE) (Dreissig, 2023) are available. Wolf et al. (2024) investigate the quality of uncertainty calibration using a UNET model (Ronneberger, 2015) for semantic segmentation. If the network was properly calibrated, it is expected that the uncertainty measure would coincide with the observed error rate in the network’s predictions. However, the authors report inconsistencies between different calibration metrics. They observe a dependency of the optimal temperature in temperature scaling for the UNET model from the used calibration metric. It is shown that the optimum temperature that minimizes the negative log-likelihood does not align with the minimum ECE. Calibration obviously depends on the distribution of the confidences over all predictions. This is the reason why the UCS for skewed data will not be coherently maximized as the ECE and the UCE are minimized. They also observe a similar decoupling between AUSE and ECE, indicating a degree of freedom in neural network calibration, which undermines the determination of unique prediction intervals. They empirically demonstrate that minimizing ECE or UCE leads to the same optimal temperature, despite UCE using the entire prediction vector and ECE relying on the probability mass of the most likely class.

These problems hinder the homologation of safety-critical applications based on neural networks in autonomous driving.

## 4 Summary and conclusions

We have demonstrated the benefits of incorporating rigorous photogrammetric modelling and uncertainty quantification in SLAM and various machine vision scenarios.

For MultiCol-SLAM, we could show that our keyframe-based approach, which is based on robust feature selection and optimized bundle adjustment schemes, outperforms classical filter-based SLAM systems. Furthermore, a generic camera model is embedded into the system supporting precise reconstruction of the imaging geometry resulting in precise maps, which are further optimized using constraints through loop closing.

Finally, all proposed modules were examined using accurate ground-truth data and it showed, that using multi-camera systems helps to improve the accuracy and robustness of SLAM in challenging environments.

In the case of Machine Vision applications, we have shown – by addressing and managing uncertainties – the opportunities for enhancing decision-making processes, so that deep-learning can also be enabled in safety in critical applications. They allow to increasing accuracy, robustness, and transparency of machine vision systems. We have shown that explicitly modelling the uncertainty in hand-eye calibration leads to more accurate results and provides information about the accuracy of the robot. In deep-learning-based image segmentation, uncertainties indicate potential segmentation errors and improve the reliability, which is essential for safety-critical tasks. We have also shown how uncertainties can improve the training process itself. Similarly, ensemble-based uncertainties in novel-view-synthesis are promising but still exhibit limitations. In 6D object pose estimation, the uncertainty of pose predictions can prevent risks in robot manipulation tasks and provide feedback for optimizing image acquisition and/or object manipulation.

Furthermore, we have highlighted the importance of neural network calibration to ensure that the predicted uncertainties are well-calibrated. This is particularly important in applications like sensor fusion, where multiple sources of information need to be combined robustly to obtain most accurate results.

Overall, handling uncertainties in machine vision not only improves the performance and reliability of such systems, but also promotes user trust and transparency. Future work should address the limitations of the currently available methods, some

of which have also been highlighted in this paper, to provide more robust, accurate, and trustworthy machine vision systems.

## References

- Barreto, J.P. / Daniilidis, K. [2005]:* Fundamental Matrix for Cameras With Radial Distortion. In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV), Vol. 1, IEEE, pp. 625–632.
- Cordts, M. / Omran, M. / Ramos, S. / Rehfeld, T. / Enzweiler, M. / Benenson, R. / Franke, U. / Roth, S. / Schiele, B. [2016]:* The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding. – In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
- Dellaert, F. / Kaess, M. [2006]:* Square Root SAM: Simultaneous Localization and Mapping Via Square Root Information Smoothing. International Journal of Robotics Research (IJRR) 25(12), pp. 1181–1203.
- Dreissig, M. / Piewak, F. / Boedecker, J. [2023]:* On the calibration of uncertainty estimation in LiDAR-based semantic segmentation. – In: IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 4798–4805.
- Fraunhofer Allianz Vision [2003]:* Guideline for Industrial Image Processing, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung, Erlangen.
- Gal, Y. / Ghahramani, Z. [2016]:* Dropout as a Bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning. – In: *Balcan, M. F. / Weinberger, K. Q. (eds.):* Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning, PMLR, New York, USA, Proceedings of Machine Learning Research, Vol. 48, pp. 1050–1059.
- Galvez-Lopez, D. / Tardos, J.D. [2012]:* Bags of binary words for fast place recognition in image sequences. IEEE Transactions on Robotics 28(5), pp. 1188–1197.
- Hartley, R. I. / Zisserman, A. [2008]:* Multiple view geometry in computer vision. University Press, Cambridge, UK.
- Haugaard, R. L. / Buch, A. G. [2022]:* SurfEmb: Dense and Continuous Correspondence Distributions for Object Pose Estimation with Learnt Surface Embeddings. – In: 2022 IEEE/CVF CVPR, pp. 6739–6748.
- He, K. / Gkioxari, G. / Dollár, P. / Girshick, R. [2017]:* Mask RCNN. – In: 2017 IEEE ICCV, pp. 2980–2988.
- Hodaň, T. / Haluza, P. / Obdržálek, Š. / Matas, J. / Lourakis, M. / Zabulis, X. [2017]:* T-LESS: An RGB-D Dataset for 6D Pose Estimation of Texture-less Objects. – In: 2017 IEEE WACV, pp. 880–888.
- Jadon, S. [2020]:* A survey of loss functions for semantic segmentation. – In: IEEE conference on computational intelligence in bioinformatics and computational biology (CIBCB), IEEE, pp. 1–7.
- Kneip, L. / Siegwart, R. / Pollefeys, M. [2012]:* Finding the exact rotation between two images independently of the translation. Springer.
- Kneip, L. / Furgale, P. / Siegwart, R. [2013]:* Using Multi-Camera Systems in Robotics: Efficient Solutions to the NPnP Problem. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, pp. 3770–3776.
- Kukelova, Z. / Heller, J. / Bujnak, M. / Pajdla, T. [2015]:* Radial distortion homography. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 639–647.
- Kuleshov, V. / Fenner, N. / Ermon, S. [2018]:* Accurate Uncertainties for Deep Learning Using Calibrated Regression. – In: International Conference on Machine Learning (ICML), Vol. 80, pp. 2796–2804.
- Labbé, Y. / Carpentier, J. / Aubry, M. / Sivic, J. [2020]:* Cosy-Pose: Consistent Multi-view Multi-object 6D Pose Estimation. – In: ECCV, p. 574–591.
- Lakshminarayanan B., Pritzel A., Blundell C. [2017]:* Simple and scalable predictive uncertainty estimation using deep ensembles. In: *Guyon, I. / Luxburg, U. V. / Bengio, S. / Wallach, H. / Fergus, R. / Vishwanathan, S. / Garnett, R. (eds):* Advances in Neural Information Processing Systems, Curran Associates, Inc., Vol. 30.
- Landgraf, S. / Wursthorn, K. / Hillemann, M. / Ulrich, M. [2024a]:* DUDES: Deep Uncertainty Distillation using Ensembles for Semantic Segmentation. – In: PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. doi:10.1007/s41064-024-00280-4
- Landgraf, S. / Hillemann, M. / Wursthorn, K. / Ulrich, M. [2024b]:* Uncertainty-aware Cross-Entropy for Semantic Segmentation. – In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. X-2-2024, pp. 129–136. doi:10.5194/isprs-annals-X-2-2024-129-2024
- Lin, T.-Y. / Goyal, P. / Girshick, R. / He, K. / Dollár, P. [2017]:* Focal loss for dense object detection. – In: Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp 2980–2988.
- MacKay, D. J. C. [1992]:* A Practical Bayesian Framework for Backpropagation Networks. – In: Neural Computation, Vol. 4, Issue 3, pp. 448–472. doi: 10.1162/neco.1992.4.3.448
- Mildenhall, B. / Srinivasan, P. P. / Tancik, M. / Barron, J. T., Ramamoorthi, R. / Ng, R. [2020]:* NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. – In: Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Springer, pp. 405–421.
- Mur-Artal, R. / Tardos, J.D. [2014]:* ORB-SLAM: tracking and mapping recognizable features. In: Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS).
- Mur-Artal, R. / Tardos, J.D. [2016]:* ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras. ArXiv e-prints.
- Hillemann, M. / Langendörfer R. / Heiken, M. / Mehlretter, M. / Schenk, A. / Weinmann, M. / Hinz, S. / Heipke, C. / Ulrich, M. [2024]:* Novel View Synthesis with Neural Radiance Fields for Industrial Robot Applications. – In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.

- XLVIII-2-2024, pp. 137–144. doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-137-2024
- Ovadia, Y. / Fertig, E. / Ren, J. / Nado, Z. / Sculley, D. / Nowozin, S. / Dillon, J. / Lakshminarayanan, B. / Snoek, J. [2019]: Can you trust your model's uncertainty? Evaluating predictive uncertainty under dataset shift. – In: NeurIPS 2019.*
- Naeini, M. P. / Cooper, G. F. / Hauskrecht, M. [2015]: Obtaining well calibrated probabilities using Bayesian binning. – In: Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence Vol. 29, Issue 1. doi:10.1609/aaai.v29i1.9602*
- Ronneberger, O. / Fischer, P. / Brox, T. [2015]: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. – In: Proceedings of the 18th Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, pp. 234–241.*
- Shrivastava, A. / Gupta, A. / Girshick, R. [2016]: Training region-based object detectors with online hard example mining. – In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 761–769.*
- Steger, C. / Ulrich, M. / Wiedemann, C. [2018]: Machine Vision Algorithms and Applications, Wiley-VCH.*
- Stewenius, H. / Engels, C. / Nister, D. [2006]: Recent Developments on Direct Relative Orientation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60(4), pp. 284–294.*
- Strasdat, H. / Montiel, J.M. / Davison, A.J. [2012]. Visual SLAM: Why Filter? Image and Vision Computing 30, pp. 65–77.*
- Sundermeyer, M. / Hodaň, T. / Labbé, Y. / Wang, G. / Brachmann, E. / Drost, B. / Rother, C. / Matas, J. [2023]: BOP Challenge 2022 on Detection, Segmentation and Pose Estimation of Specific Rigid Objects. – In: 2023 IEEE/CVF CVPR, pp. 2784–2793.*
- Tancik, M. / Weber, E. / Ng, E. / Li, R. / Yi, B. / Wang, T. / Kristoffersen, A. / Austin, J. / Salahi, K. / Ahuja, A. et al. [2023]: Nerfstudio: A modular framework for neural radiance field development. – In: ACM SIGGRAPH 2023 Conference Proceedings, pp. 1–12.*
- Ulrich, M. / Hillemann, M., [2024]: Uncertainty-Aware Hand-Eye Calibration. – In: IEEE Transactions on Robotics, Vol 40, pp. 573–591. doi:10.1109/TRO.2023.3330609*
- Urban, S. / Leitloff, J. / Wursthorn S. / Hinz, S. [2013]: Self-Localization of a Multi-Fisheye Camera Based Augmented Reality System in textureless 3D Building Models. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W2, 43–48.*
- Urban, S. / Leitloff, J. / Hinz, S. [2015]: Improved Wide-Angle, Fisheye and Omnidirectional Camera Calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 108, pp. 72–79.*
- Urban, S. / Jutzi, B. [2016]: LaFiDa - A Laserscanner Multi-Fisheye Camera Dataset. Journal of Imaging.*
- Urban, S. / Hinz, S. [2016]: Multicol-slam-a modular real-time multi-camera slam system. arXiv preprint arXiv:1610.07336*
- Urban, S. / Leitloff, J. / Hinz, S. [2016]: MLPnP: A Real-Time Maximum Likelihood Solution to the Perspective-N-Point problem. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, III-3:131-138.*
- Urban, S. / Wursthorn, S. / Leitloff, J. / Hinz, S. [2017a]: Multi-Col Bundle Adjustment: A Generic Method for Pose Estimation, Simultaneous Self-Calibration and Reconstruction for Arbitrary Multi-Camera Systems. International Journal of Computer Vision (IJCV) 121, pp. 234–252.*
- Urban, S. / Weinmann, M. / Hinz, S. [2017b]: mdBRIEF-a fast online-adaptable, distorted binary descriptor for real-time applications using calibrated wide-angle or fisheye cameras. Computer Vision and Image Understanding 162, 71-86*
- Wang, Y. / Wang, H. / Shen, Y. / Fei, J. / Li, W. / Jin, G. / Wu, L. / Zhao, R. / Le, X. [2022]: Semi-supervised semantic segmentation using unreliable pseudo-labels. – In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 4248–4257.*
- Wolf, D. W. / Prasannavenkatesh, B. / Braun, A. / Ulrich, M. [2024]: Decoupling of neural network calibration measures. – To appear in: DAGM German Conference on Pattern Recognition.*
- Wursthorn, K. / Hillemann, M. / Ulrich, M. [2024]: Uncertainty Quantification with Deep Ensembles for 6D Object Pose Estimation. – In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. X-2-2024, pp. 223–230. doi:10.5194/isprs-annals-X-2-2024-223-2024*
- Xiang, Y. / Schmidt, T. / Narayanan, V. / Fox, D. [2018]: PoseCNN: A Convolutional Neural Network for 6D Object Pose Estimation in Cluttered Scenes. – In: Robotics: Science and Systems (RSS).*

#### **Anschriften der Verfasser:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Ulrich  
 Karlsruhe Institute of Technology  
 Institute of Photogrammetry and Remote Sensing  
 Englerstr. 7, 76131 Karlsruhe  
 markus.ulrich@kit.edu

Dr.-Ing. Steffen Urban  
 Carl Zeiss AG  
 Carl Zeiss Promenade 10, 07745 Jena  
 steffen.urban@zeiss.com

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz  
 Karlsruhe Institute of Technology  
 Institute of Photogrammetry and Remote Sensing  
 Englerstr. 7, 76131 Karlsruhe  
 stefan.hinz@kit.edu



# Publikationsliste Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Mayer

Veröffentlichungen geordnet nach Kategorien

## I. Veröffentlichungen in Zeitschriften

- 41 Huang, X., Chen, K., Tang, D., Liu, C., Ren, L., Sun, Z., Hänsch, R., Schmitt, M., Sun, X., Huang, H., Mayer, H. (2023): Urban Building Classification (UBC) V2 — A Benchmark for Global Building Detection and Fine-Grained Classification From Satellite Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 61, 1-16.
- 40 Bill, R., Blankenbach, J., Breunig, M., Haurert, J.-H., Heipke, C., Herle, S., Maas, H.-G., Mayer, H., Meng, L., Rottensteiner, F., Schiewe, J., Sester, M., Sörgel, U., Werner, M. (2022): Geospatial Information Research: State of the Art, Case Studies and Future Perspectives. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 90 (4), 349-389.
- 39 Sun, X., Shi, A., Huang, H., Mayer, H. (2020): BAS<sup>4</sup>Net: Boundary-Aware Semi-Supervised Semantic Segmentation Network for Very High Resolution Remote Sensing Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13, 5398-5413.
- 38 Micheline, M., Mayer, H. (2020): Structure from Motion for Complex Image Sets. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 166: 140-152.
- 37 Zhang, W., Huang, H., Schmitz, M., Sun, X., Wang, H., Mayer, H. (2017): Effective Fusion of Multi-modal Remote Sensing Data in a Fully Convolutional Network for Semantic Labeling. *Remote Sensing* 10 (1), 52.
- 36 Roth, L., Kuhn, A., Mayer, H. (2017): Wide-Baseline Image Matching with Projective View Synthesis and Calibrated Geometric Verification. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 85 (2), 85-95.
- 35 Kuhn, A., Mayer, H., Hirschmüller, H., Scharstein, D. (2017): A TV Prior for High-Quality Scalable Multi-View Stereo Reconstruction. *International Journal of Computer Vision* 124 (1), 2-17.
- 34 Brandenburger, W., Drauschke, M., Mayer, H. (2013): Cornice Detection Using Façade Image and Point Cloud. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2013 (5): 511-521.
- 33 Bartelsen, J., Mayer, H., Hirschmüller, H., Kuhn, A., Micheline, M. (2012): Orientation and Dense Reconstruction from Unordered Wide Baseline Image Sets. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2012 (4): 421-432.
- 32 Arefi, H., d'Angelo, P., Mayer, H., Reinartz, P. (2011): Iterative Approach for Efficient Digital Terrain Model Production from CARTOSAT-1 Stereo Images. *Journal of Applied Remote Sensing* 5, 053527-1-19.
- 31 Bartelsen, J., Mayer, H. (2010): Orientation of Image Sequences Acquired from UAVs and with GPS Cameras. *Surveying and Land Information Science* 70 (3): 151-159.

- 30 Huang, H., Mayer, H. (2009): Generative Statistical 3D Reconstruction of Unfoliated Trees from Terrestrial Images. *Annals of GIS* 15 (2): 97-105.
- 29 Reznik, S., Mayer, H. (2008): Implicit Shape Models, Self-Diagnosis, and Model Selection for 3D Facade Interpretation. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2008 (3): 187-196.
- 28 Mayer, H. (2008): Object Extraction in Photogrammetric Computer Vision. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 63 (2): 213-222.
- 27 Heipke, C., Oberst, J., Albertz, J., Attwenger, M., Dorninger, P., Dorrer, E., Ewe, M., Gehrke, S., Gwinner, K., Hirschmüller, H., Kim, J.R., Kirk, R.L., Mayer, H., Muller, J.-P., Rengarajan, R., Rentsch, M., Schmidt, R., Scholten, F., Shan, J., Spiegel, M., Wählich, M., Neukum, G., the HRSC Co-Investigator Team (2007): Evaluating planetary digital terrain models – The HRSC DTM test. *Planetary and Space Science* 55: 2173-2191.
- 26 Huang, H., Mayer, H. (2007): Extraction of the 3D Branching Structure of Unfoliated Deciduous Trees from Image Sequences. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2007 (6): 429-436.
- 25 Mayer, H. (2007): 3D Reconstruction and Visualization of Urban Scenes from Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 3/2007: 167-176.
- 24 Mayer, H., Reznik, S. (2007): Building Facade Interpretation from Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 61 (6): 371-380.
- 23 Yu, Q., Fu, S., Mayer, H., Liu, X., Yang, X. (2007): Coregistration Based on Three Parts of Two Complex Images and Contoured Windows for Synthetic Aperture Radar interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 4 (2): 288-292.
- 22 Forberg, A., Mayer, H. (2006): Simplification of 3D Building Data. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 131 (3): 148-152.
- 21 Mayer, H. (2006): Cooperative Disparity Estimation and Its Improvement. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2006 (2): 139-151.
- 20 Mayer, H. (2006): What Next: Autonomous Photogrammetric Image Understanding? *GIS – Geo-Informationssysteme* 2006 (4): 26-31.
- 19 Yu, Q., Fu, S., Mayer, H., Liu, X., Yang, X., Lei, Z. (2006): Generation of Speckle-Reduced Phase Images from Three Complex Parts for Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Applied Physics Letters* 88, 114106, online, 3 Seiten.
- 18 Albertz, J., Attwenger, M., Barrett, J., Casley, S., Dorninger, P., Dorrer, E., Ebner, H., Gehrke, S., Giese, B., Gwinner, K., Heipke, C., Howington-Kraus, E., Kirk, R.L., Lehmann, H., Mayer, H., Muller, J.-P., Oberst, J., Ostrovskiy, A., Renter, J., Reznik, S., Schmidt, R., Scholten, F., Spiegel, M., Stilla, U., Wählich, M., Neukum, G., and the HRSC CoI-Team (2005): HRSC on Mars Express – Photogrammetric and Cartographic Research. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71 (10): 1153-1166.
- 17 Dorrer, E., Mayer, H., Haase, Y., Ostrovskiy, A., Renter, J., Rentsch, M., Reznik, S.,



- Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team (2005): Verbesserung räumlicher Daten durch „Shape from Shading“. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2005 (5): 403-408.
- 16 Mayer, H. (2005): Scale-Spaces for Generalization of 3D Buildings. *International Journal for Geographical Information Science* 19 (8-9): 975-997.
  - 15 Hellwich, O., Laptev, I., Mayer, H. (2002): Extraction of Linear Objects from Interferometric SAR data. *International Journal of Remote Sensing* 23 (3): 461-475.
  - 14 Mayer, H. (2002): Fundamental Matrix and Trifocal Tensor for View Synthesis. *Bildtechnik/Image Science* 2002 (1): 129-141.
  - 13 Laptev, I., Mayer, H., Lindeberg, T., Eckstein, W., Steger, C., Baumgartner, A. (2000): Automatic Extraction of Roads from Aerial Images Based on Scale Space and Snakes. *Machine Vision and Applications* 12 (1): 23-31.
  - 12 Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H. (1999): Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping, and Context. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65 (7): 777-785.
  - 11 Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H. (1999): Automatische Straßenextraktion auf Grundlage von verschiedenen Auflösungsstufen, Netzbildung und Kontext. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 1999 (1): 5-17.
  - 10 Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H. (1999): Estrazione automatica di strade da modelli fotogrammetrici digitali. Ministero delle Finanze Italia, *Rivista del dipartimento del territorio VII* (3): 7-21.
  - 9 Mayer, H. (1999): Automatic Object Extraction from Aerial Imagery - A Survey Focusing on Buildings. *Computer Vision and Image Understanding* 74 (2):138-149.
  - 8 Mayer, H. (1999): LOD Generation for Buildings Based on Scale-Spaces. *Bulletin SFPT No 153, Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*: 75-77.
  - 7 Mayer, H., Heipke, C., Ebner, H. (1999): Análisis de imágenes basado en conocimientos por extracción de objetos topográficos: Fundamentos e interpretación de mapas catastrales. *Topografía y Cartografía* 90 (XVI): 22-37.
  - 6 Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C. Jamet, O. (1998): External evaluation of automatically extracted road axes. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 1998 (2): 81-94.
  - 5 Mayer, H. (1998): Maßstabsräume: Theorie und Anwendung. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 1998 (4): 197-208.
  - 4 Mayer, H., Steger, C. (1998): Scale-space events and their link to abstraction for road extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53 (2): 62-75.
  - 3 Mayer, H. (1996): Using real world knowledge for the automatic acquisition of GIS-objects from scanned maps. *GIS - Geo-Information-Systeme* 9 (2): 14-20.
  - 2 Mayer, H., Heipke, C., Ebner, H. (1995): Wissensbasierte Bildanalyse zur Extraktion von topographischen Objekten - Grundlagen und Interpretation von Katasterkarten. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 120 (6): 285-298.
  - 1 Mayer, H., Heipke, C., Maderlechner, G. (1993): Wissensbasierte automatische

Interpretation von gescannten Karten großen Maßstabs. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen I (110): 79-97.

## II. Begutachtete Veröffentlichungen (full paper)

- 54 Huang, H., Hild, K., Wang, Y., Körner, M., Mayer, H. (2024): Data on Demand: Automatic Generation of Customized Datasets for the Training of Building Detection in Remote Sensing Imagery. IGARSS 2024 – 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- 53 Flotzinger, J., Rösch, P.J., Benz, C., Ahmad, M., Cankaya, M., Mayer, H., Rodehorst, V., Oswald, N., Braml, T. (2024): Dacl-Challenge: Semantic Segmentation During Visual Bridge Inspections. IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, 716-725.
- 52 Leibl, A., Meißner, A., Altmann, S., Attenberger, A., Mayer, H. (2023) De-identifying Face Image Datasets While Retaining Facial Expressions. International Joint Conference on Biometrics.
- 51 Osswald-Cankaya, M., Mayer, H. (2023): Fine-Grained Airplane Recognition in Satellite Images based on Task Separation and Orientation Normalization. IGARSS 2023 – 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- 50 Wang, X., Huang, H., Cabalo, C., Körner, M., Mayer, H. (2023): Fully Automatic Generation of Training Data for Building Detection and Classification from Remote Sensing Imagery. IGARSS 2023 – 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- 49 Huang, X., Ren, L., Liu, C., Wang, Y., Yu, H., Schmitt, M., Hänsch, R., Sun, X., Huang, H., Mayer, H. (2022): Urban Building Classification (UBC) – A Dataset for Individual Building Detection and Classification from Satellite Imagery. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Workshop EarthVision: Large Scale Computer Vision for Remote Sensing Imagery, 1413-1421.
- 48 Rahmani, K., Mayer, H. (2022): A Hybrid Method for Window Detection on High Resolution Facade Images. International Conference on Intelligent Systems and Pattern Recognition, 43-50.
- 47 Micheline, M., Mayer, H. (2019): Detection of Critical Camera Configurations for Structure from Motion Using Random Forest. Asian Conference on Pattern Recognition, 512-526.
- 46 Kissner, M., Mayer, H. (2019): A Neural-Symbolic Architecture for Inverse Graphics Improved by Lifelong Meta-Learning. German Conference on Pattern Recognition, 471-484 und arXiv preprint arXiv:1905.08910.
- 45 Roth, L., Mayer, H. (2019): Reduction of the Fronto-parallel Bias for Wide-baseline Semi-global Matching. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IV-2/W5), 69-76.
- 44 Kuhn, A., Roth, L., Frahm, J.-M., Mayer, H. (2018): Improvement of Extrinsic

- Parameters from a Single Stereo Pair. IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 1011-1019.
- 43 Rahmani, K., Mayer, H. (2018): High Quality Facade Segmentation Based on Structured Random Forest, Region Proposal Network and Rectangular Fitting. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IV-2), 223-230.
  - 42 Huang, H., Mayer, H. (2017): Towards Automatic Large-Scale 3D Building Reconstruction: Primitive Decomposition and Assembly. Societal Geo-innovation, 20th AGILE Conference on Geographic Information Science, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, 205-221.
  - 41 Kuhn, A., Price, T., Frahm, J.-M., Mayer, H. (2017): Down to Earth: Using Semantics for Robust Hypothesis Selection for the Five-Point Algorithm. German Conference on Pattern Recognition, 389-400.
  - 40 Nguatem, W., Mayer, H. (2017): Modeling Urban Scenes from Pointclouds. International Conference on Computer Vision, 3837-3846.
  - 39 Rahmani, K., Huang, H., Mayer, H. (2017): Facade Segmentation with a Structured Random Forest. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IV-1-W1), 175-181.
  - 38 Kuhn, A., Huang, H., Drauschke, M., Mayer, H. (2016): Fast Probabilistic Fusion of 3D Point Clouds via Occupancy Grids for Scene Classification. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (III-3), 325-332.
  - 37 Micheline, M., Mayer, H. (2016): Efficient Wide Baseline Structure from Motion. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (III-3), 99-106.
  - 36 Nguatem, W., Mayer, H. (2016): Contiguous Patch Segmentation in Pointclouds. German Conference on Pattern Recognition, 131-142.
  - 35 Drauschke, M., Mayer, H. (2015): The Potential of Specular Reflections for Facade Image Analysis. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II (3/W4), 33-40.
  - 34 Huang, H., Mayer, H. (2015): Robust and Efficient Urban Scene Classification Using Relative Features. 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information System, 81:1-81:4.
  - 33 Kuhn, A., Mayer, H. (2015): Incremental Division of Very Large Point Clouds for Scalable 3D Surface Reconstruction. International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops, 4321-4329.
  - 32 Drauschke, M., Mayer, H. (2015): The Potential of Specular Reflections for Facade Image Analysis. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II (3/W4), 33-40.
  - 31 Huang, H., Jiang, H., Brenner, C., Mayer, H. (2014): Object-level Segmentation of RGBD Data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II (3), 73-78.
  - 30 Kuhn, A., Mayer, H., Hirschmüller, H., Scharstein, D. (2014): A TV Prior for High

- Quality Local Multi-View Stereo Reconstruction. 2nd International Conference on 3D Vision (3DV), 65-72.
- 29 Mayer, H. (2014): Efficient Hierarchical Triplet Merging for Camera Pose Estimation. German Conference on Pattern Recognition, 399-409.
  - 28 Nguatem, W., Drauschke, M., Mayer, H. (2014): Localization of Windows and Doors in 3D Point Clouds of Facades. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II (3), 87-94.
  - 27 Kuhn, A., Hirschmüller, H., Mayer, H. (2013): Multi-Resolution Range Data Fusion for Multi-View Stereo Reconstruction. German Conference on Pattern Recognition, 41-50.
  - 26 Nguatem, W., Drauschke, M., Mayer, H. (2013): Roof Reconstruction from Point Clouds Using Importance Sampling, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II (3/W3), 73-78.
  - 25 Bartelsen, J., Mayer, H., Hirschmüller, H., Kuhn, A., Michelini, M. (2012): Orientation and Dense Reconstruction of Unordered Terrestrial and Aerial Wide Baseline Images Sets. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I (3), 25-30.
  - 24 Kondermann, D., Abraham, S., Brostow, G., Förstner, W., Gehrig, S., Imiya, A., Jähne, B., Klose, F., Magnor, M., Mayer, H., Mester, R., Pajdla, T., Reulke, R., Zimmer, H. (2012): On Performance Analysis of Optical Flow Algorithms. Real-World Scene Analysis 2011, Lecture Notes in Computer Science 7474, Springer, Berlin, 329-355.
  - 23 Mayer, H., Bartelsen, J., Hirschmüller, H., Kuhn, A. (2012): Dense 3D Reconstruction from Wide Baseline Image Sets. Real-World Scene Analysis 2011, Lecture Notes in Computer Science 7474, Springer, Berlin, 285-304.
  - 22 Drauschke, M., Mayer, H. (2010): Evaluation of Texture Energies for Classification of Facade Images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (3A), 257-263.
  - 21 Mayer, H. (2008): Issues for Image Matching in Structure from Motion. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37 (B3a), 21-26.
  - 20 Huang, H., Mayer, H. (2007): Extraction of 3D Unfoliated Trees from Image Sequences via a Generative Statistical Approach. Pattern Recognition - 29th DAGM Symposium, Springer, Berlin, 385-394.
  - 19 Reznik, S., Mayer, H. (2007): Implicit Shape Models, Model Selection, and Plane Sweeping for 3D Facade Interpretation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (3/W49A), 173-178.
  - 18 Ton, D., Mayer, H. (2007): 3D Least-Squares-Based Surface Reconstruction. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (3/W49A), 69-74.
  - 17 Mayer, H. (2006): 3D Reconstruction and Visualization of Urban Scenes from Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (5), 207-212.

- 16 Mayer, H., Hinz, S., Bacher, U., Baltsavias, E. (2006): A Test of Automatic Road Extraction Approaches. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3), 209-214.
- 15 Mayer, H., Reznik, S. (2006): MCMC Linked with Implicit Shape Models and Plane Sweeping for 3D Building Facade Interpretation in Image Sequences. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3), 130-135.
- 14 Bacher, U., Mayer, H. (2005): Automatic Road Extraction from Multispectral High Resolution Satellite Images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3/W24), 29-34.
- 13 Mayer, H. (2005): Robust Least-Squares Adjustment Based Orientation and Auto-Calibration of Wide-Baseline Image Sequences. *ISPRS Workshop in conjunction with ICCV 2005 "Towards Benchmarking Automated Calibration, Orientation and Surface Reconstruction from Images" (BenCos)*, Beijing, China.
- 12 Mayer, H., Reznik, S. (2005): Building Façade Interpretation from Image Sequences. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3/W24), 55-60.
- 11 Forberg, A., Mayer, H. (2003): Squaring and Scale-Space Based Generalization of 3D Building Data. *Fifth Workshop on Progress in Automated Map Generalization*, [www.geo.unizh.ch/ICA/docs/paris2003/papers03.html](http://www.geo.unizh.ch/ICA/docs/paris2003/papers03.html), 6 Seiten.
- 10 Hao, X., Mayer, H. (2003): Orientation and Auto-Calibration of Image Triplets and Sequences. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (3/W8), 73-78.
- 9 Mayer, H. (2003): Analysis of Means to Improve Cooperative Disparity Estimation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (3/W8), 25-31.
- 8 Mayer, H. (2003): Robust Orientation, Calibration, and Disparity Estimation of Image Triplets. *Pattern Recognition - 25th DAGM Symposium*, Springer, Berlin, 281-288.
- 7 Mayer, H. (2002): Estimation of and View Synthesis with the Trifocal Tensor. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (3A), 211-217.
- 6 Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H. (1999): Automatic Road Extraction in Rural Areas. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 32 (3-2W5), 107-112.
- 5 Mayer, H., Mayr, W. (1999): Automatic Extraction of Deciduous Trees from High Resolution Aerial Imagery. *Mustererkennung 1999*, Springer, Berlin, 102-110.
- 4 Mayer, H., Laptev, I., Baumgartner, A. (1998): Multi-scale and snakes for automatic road extraction. *Fifth European Conference on Computer Vision* 1, 720-733.
- 3 Mayer, H. (1996): Extracting narrow linear structures from remote sensing images using search, global non-maximum suppression and resolution/scale integration. In: *Informatik aktuell, Mustererkennung 1996*, Springer, Berlin, 374-382.

- 2 Wiedemann, C., Mayer, H. (1996): Automatic verification of roads in digital images using profiles. In: Informatik aktuell, Mustererkennung 1996, Springer, Berlin, 609-618.
- 1 Mayer, H., Heipke, C., Maderlechner, G. (1993): Wissensbasierte automatische Extraktion von semantischer Information aus Katasterkarten. In: Informatik aktuell, Mustererkennung 1993, Springer, Berlin, 367-374.

### III. Promotion und Habilitation

- 2 Mayer, H. (1998): Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 494.
- 1 Mayer, H. (1994): Automatische wissensbasierte Extraktion von semantischer Information aus gescannten Karten. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 417.

### IV. Kapitel in Büchern oder (Online-) Enzyklopedien

- 9 Kutterer, H., Neuner, H., Mayer, H., Haurert, J.-H., Weitkamp, A. (2020): Forschungsvorhaben. Kapitel 19 in „Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen“, Wichmann, Berlin, 1067-1126.
- 8 Huang, H., Kuhn, A., Michelini, M., Schmitz, M., Mayer, H. (2019): 3D Urban Scene Reconstruction and Interpretation from Multisensor Imagery. In: Multimodal Scene Understanding, Academic Press, 307-340.
- 7 Mayer, H., Michelini, M. (2017): Orientierung großer Bildverbände. Handbuch der Geodäsie, Band Photogrammetrie und Fernerkundung, Kapitel 6, Springer, Berlin, 197-228.
- 6 Mayer, H. (2014): Photogrammetrie und Fernerkundung. Abschnitt 17.4 in „Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2015“, Wichmann, Berlin-Charlottenburg, 1025-1031.
- 5 Mayer, H., Sester, M., Vosselman, G., (2013): Basic Computer Vision Techniques. In: Manual of Photogrammetry – Sixth Edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Bethesda, USA, 517-583.
- 4 Mayer, H., Hinz, S., Stilla, U. (2008): Automated Extraction of Roads, Buildings and Vegetation from Multi-Source Data. Chapter 16 of “Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 Congress Book”, Taylor & Francis, London, 213-226.
- 3 Mayer, H., Baltsavias, E., Bacher, U. (2006): Automated Extraction, Refinement, and Update of Road Databases from Imagery and Other Data. In: European Spatial Data Research (EuroSDR) Official Publication No. 50, 217-280.
- 2 Vosselman, G., Sester, M., Mayer, H. (2004): Basic Computer Vision Techniques. In: Manual of Photogrammetry – Fifth Edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Bethesda, USA, 455-504.

- 1 Mayer, H., Baumgartner, A., Steger, C. (1998): Road extraction from aerial imagery. In CVonline: On-line Compendium of Computer Vision: [www.dai.ed.ac.uk/CVonline/](http://www.dai.ed.ac.uk/CVonline/).

#### V. Nicht-begutachtete Veröffentlichungen

- 78 Huang, H., Michelini, M., Schmitz, M., Roth, L., Mayer, H. (2020): LOD3 Building Reconstruction from Multi-source Images. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XLIII/B2), 427-434.
- 77 Kissner, M., Mayer, H. (2019): Adding Intuitive Physics to Neural-Symbolic Capsules Using Interaction Networks. arXiv preprint arXiv:1905.09891.
- 76 Mayer, H. (2019): RPBA – Robust Parallel Bundle Adjustment Based on Covariance Information. arXiv preprint arXiv:1910.08138.
- 75 Schmitz, M., Brandenburger, W., Mayer, H. (2019): Semantic Segmentation of Airborne Images and Corresponding Digital Surface Models – Additional Input Data or Additional Task? The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XLII-2/W16), 195-200.
- 74 Schmitz, M., Huang, H., Mayer, H. (2019): Comparison of Training Strategies for Convnets on Multiple Similar Datasets for Facade Segmentation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XLII-2/W13), 111-117.
- 73 Huang, H., Burger, P., Schmitz, M., Roth, L., Wünsche, H.-J., Mayer, H. (2018): Driving in unknown areas: From UAV images to map for autonomous vehicles. 11th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Computational Transportation Science (IWCTS'18), 39-42.
- 72 Mayer, H. (2018): Modelle der realen Welt für die Bildinterpretation. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München 95, 101-110.
- 71 Mayer, H., Huang, H., Kuhn, A., Michelini, M., Nguatem, W., Roth, L., Schmitz, M., Drauschke, M. (2017): Bilder vom Boden und vom UAV: Orientierung, dichte 3D Rekonstruktion und funktionale Modellierung. DGPF Tagungsband 26, 122-128.
- 70 Zhang, W., Huang, H., Schmitz, M., Sun, X., Wang, H., Mayer, H. (2017): A Multi-Resolution Fusion Model Incorporating Color and Elevation for Semantic Segmentation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XLII-1/W1), 513-517.
- 69 Nguatem, W., Drauschke, M., Mayer, H. (2016): Automatic Generation of Building Models with Levels of Detail 1-3. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XLI-B3), 649-654.
- 68 Schmitz, M., Mayer, H. (2016): A Convolutional Network for Semantic Facade Segmentation and Interpretation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XLI-B3), 709-715.
- 67 Drauschke, M., Mayer, H. (2015): Untersuchung zur Detektion von spekulären

- Reflexionen in Fassadenbildern. DGPF Tagungsband 24, 154-163.
- 66 Mayer, H. (2015): From Orientation to Functional Modeling for Terrestrial and UAV Images. Photogrammetric Week '15, Wichmann, Berlin, 165-174.
- 65 Partovi, T., Huang, H., Krauß, T., Mayer, H., Reinartz, P. (2015): Statistical Building Roof Reconstruction from Worldview-2 Stereo Imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40 (3/W2), 161-167.
- 64 Micheline, M., Mayer, H. (2014): Detection of Critical Camera Configurations for Structure from Motion. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40 (3/W1), 73-78.
- 63 Brandenburger, W., Drauschke, M., Nguatem, W., Mayer, H. (2013): Detektion von Fensterverdachungen und Gesims in Fassadenbildern und Punktwolken. DGPF Tagungsband 22, 202-209.
- 62 Mayer, H., Bartelsen, J., Hirschmüller, H., Kuhn, A., Micheline, M. (2013): Orientierung und dichte 3D-Rekonstruktion aus ungeordneten Bildmengen mit großer Basis. 17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2013, Wichmann, Berlin, 135-143.
- 61 Mayer, H. (2012): Von Photogrammetrie und Fernerkundung zu Visual Computing. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München 87, 157-165.
- 60 Nguatem, W., Drauschke, M., Mayer, H. (2012): Finding Cuboid-based Building Models in Point Clouds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 39 (B3), 149-154.
- 59 Bartelsen, J., Mayer, H. (2010): Orientation of Image Sequences Acquired from UAVs and with GPS Cameras. European Calibration and Orientation Workshop (EuroCOW), 6 Seiten.
- 58 Arefi, H., d'Angelo, P., Mayer, H., Reinartz, P. (2009): Automatic Generation of Digital Terrain Models from Cartosat-1 Stereo Images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (1-4-7/W5), 6 Seiten.
- 57 Arefi, H., Engels, J., Hahn, M., Mayer, H. (2008): Levels of Detail in 3D Building Reconstruction from LIDAR Data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37 (B3b), 485-490.
- 56 Mayer, H., Bartelsen, J. (2008): Automated 3D Reconstruction of Urban Areas from Networks of Wide-Baseline Image Sequences. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37 (B5), 633-638.
- 55 Arefi, H., Engels, J., Hahn, M., Mayer, H. (2007): Approximation of Building Boundaries. 26<sup>th</sup> International Symposium of Urban Data Management, 25-33.
- 54 Heipke, C., Oberst, J., Albertz, J., Attwenger, M., Dorninger, P., Dorrer, E., Ewe, M., Gehrke, S., Gwinner, K., Hirschmüller, H., Kim, J.R., Kirk, R.L., Mayer, H., Muller, J.-P., Rengarajan, R., Rentsch, M., Schmidt, R., Scholten, F., Shan, J., Spiegel, M., Wählich, M., Neukum, G., the HRSC Co-Investigator Team (2007): The HRSC DTM



- test. Proceedings ISPRS, WG IV/7 Extraterrestrial Mapping Workshop "Advances in planetary mapping", Lunar and Planetary Institute, Houston, USA, 33-34.
- 53 Mayer, H. (2007): Automatische Orientierung mit und ohne Messmarken – Das Mögliche und das Unmögliche. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung 16, 457-464.
  - 52 Mayer, H. (2007): Efficiency and Evaluation of Markerless 3D Reconstruction from Weakly Calibrated Long Wide-Baseline Image Loops. Optical 3-D Measurement Techniques II, 213-219.
  - 51 Heipke, C., Oberst, J., Albers, J., Attwenger, M., Dorninger, P., Dorrer, E., Ewe, M., Gehrke, S., Gwinner, K., Hirschmüller, H., Kim, J., Kirk, R., Mayer, H., Müller, J., Rengarajan, R., Rentsch, M., Schmidt, R., and the HRSC Co-Investigator Team (2006): The HRSC DTM Test: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (4), 311-325.
  - 50 Hirschmüller, H., Mayer, H., Neukum, G. and the HRSC-CoI Team (2006): Stereo Processing of HRSC Mars Express Images by Semi-Global Matching, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (4), 6 Seiten.
  - 49 Mayer, H. (2005): What Next: Autonomous Photogrammetric Image Understanding? Photogrammetric Week '05, Wichmann, 331-339.
  - 48 Bacher, U., Mayer, H. (2004): Automatic Road Extraction from IRS Satellite Images in Agricultural and Desert Areas. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35 (B3), 1055-1060.
  - 47 Dorrer, E., Mayer, H., Ostrovskiy, A., Reznik, S., HRSC Co-Investigator Team (2004): De- and Re-Shading of MARS Express HRSC Image Data for Homogenization of Map Relief Shading. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35 (B4), 1299-1303.
  - 46 Mayer, H. (2004): Object Extraction for Digital Photogrammetric Workstations. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35 (B2), 414-422.
  - 45 Mayer, H., Mosch, M., Peipe, J. (2004): 3D Model Generation and Visualization of Wartburg Castle. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (5/W1), 5 Seiten – CD-ROM.
  - 44 Bacher, U., Mayer, H. (2003): Fuzzy-Classification and Ziplock Snakes for Road Extraction from IKONOS Images. ISPRS / EARSeL Joint Workshop on High Resolution Mapping from Space 2003, 6 Seiten.
  - 43 Mayer, H., Mosch, M., Peipe, J. (2003): Comparison of Photogrammetric and Computer Vision Techniques – 3D Reconstruction and Visualization of Wartburg Castle. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34 (5/C15), 103-108.
  - 42 Forberg, A., Mayer, H. (2002): Generalization of 3D Building Data Based on Scale-Spaces. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial

- Information Sciences 34 (4), 225-230.
- 41 Mayer, H., Büchner, W., Riegel, T. (2002): View Interpolation with the Trifocal Tensor from Uncalibrated Imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (5), 192-197.
  - 40 Hinz, S., Baumgartner, A., Mayer, H., Wiedemann, C., Ebner, H. (2001): Road Extraction Focussing on Urban Areas. In: *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*, Balkema Publishers, Rotterdam, Niederlande, 255-265.
  - 39 Bacher, U., Mayer, H. (2000): Automatic Extraction of Trees in Urban Areas from Aerial Imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (B3/1), 51-57.
  - 38 Mayer, H. (2000): Scale-Space Events for the Generalization of 3D-Building Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (B4/2), 639-646.
  - 37 Baumgartner, A., Eckstein, W., Heipke, C., Hinz, S., Mayer, H., Radig, B., Steger, C., Wiedemann, C. (1999): T-REX: TUM Research on Road Extraction. *Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner zum 60. Geburtstag*, 43-64.
  - 36 Hinz, S., Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H., Radig, B. (1999): Road Extraction in Rural and Urban Areas. *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, SMATI '99, München*, 7-27.
  - 35 Mayer, H. (1999): LOD Generation for Buildings based on Scale-Spaces. *International Workshop on 3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements, Paris, Frankreich, 7.-9. April 1999*, 145-160.
  - 34 Mayer, H. (1999): Trends and Perspectives of Automated GIS Data Collection. *Photogrammetric Week '99, Wichmann*, 281-288.
  - 33 Mayr, W., Mayer, H., Bacher, U., Ebner, H. (1999): Automatic Extraction of Trees from Aerial Imagery. *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, SMATI '99, München*, 28-39.
  - 32 Hellwich, O., Laptev, I., Mayer, H. (1998): Automated pipeline extraction from interferometric SAR data of the ERS tandem mission. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 32 (7), 532-537.
  - 31 Mayer, H. (1998): Maßstabsräume: Theorie und Modellgeneralisierung von Gebäudeumrissen. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung* 6, 311-321.
  - 30 Mayer, H. (1998): Model-generalization of building outlines based on scale-spaces and scale-space events. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 32 (3/1), 530-536.
  - 29 Wiedemann, C., Heipke, C., Mayer, H., Hinz, S. (1998): Automatic Extraction and Evaluation of Road Networks from MOMS-2P Imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 32 (3/1), 285-291.
  - 28 Wiedemann, C., Heipke, C., Mayer, H. (1998): Empirical Evaluation of Automatically

- Extracted Road Axes. CVPR Workshop on "Empirical Evaluation Methods in Computer Vision", IEEE Computer Society Press, 172-187.
- 27 Baumgartner, A., Eckstein, W., Mayer, H., Heipke, C., Ebner, H. (1997): Context-supported road extraction. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images II, Birkhäuser, Basel, Schweiz, 299-308.
  - 26 Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W. (1997): Multi-resolution, semantic objects and context for road extraction. Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, Birkhäuser, Basel, Schweiz, 140-156.
  - 25 Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W. (1997): Semantic objects and context for finding roads. Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III, SPIE 3072, 98-109.
  - 24 Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C., Jamet, O. (1997): Evaluation of automatic road extraction. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 32 (3-2W3), 47-56 (auch in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 32 (3-4W2), 151-160).
  - 23 Mayer, H., Laptev, I., Baumgartner, A., Steger, C. (1997): Automatic road extraction based on multi-scale modeling, context, and snakes. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 32 (3-2W3), 106-113.
  - 22 Mayer, H., Steger, C. (1997): A new approach for line extraction and its integration in a multi-scale, multi-abstraction-level road extraction system. IAPR TC-7 Workshop: Mapping Buildings, Roads and Other Man-Made Structures from Images, R. Oldenbourg, Wien, Österreich, 331-348.
  - 21 Steger, C., Mayer, H., Radig, B. (1997): The role of grouping for road extraction. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images II, Birkhäuser, Basel, 245-256.
  - 20 Baumgartner, A., Steger, C., Wiedemann, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H. (1996): Update of roads in GIS from aerial imagery: verification and multi-resolution extraction. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31 (B3/III), 53-58.
  - 19 Hellwich, O., Mayer, H. (1996): Extracting line features from synthetic aperture radar (SAR) scenes using Markov random field model. International Conference for Image Processing, 883-886.
  - 18 Hellwich, O., Mayer, H., Winkler, G. (1996): Detection of lines in synthetic aperture radar (SAR) scenes. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31 (B3/III), 312-320.
  - 17 Mayer, H. (1996): Abstraction and scale-space events in image understanding. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31 (B3/III), 523-528.
  - 16 Würländer, R., Gruber, M., Mayer, H. (1996): Photorealistic terrain visualization using methods of 3D-computer-graphics and digital photogrammetry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31 (B4/IV), 972-977.
  - 15 Englisch, A., Mayer, H., Heipke, C., Reinhardt, W. (1995): On the role of digital photogrammetry for updating ATKIS-DLM. Workshop IUSM Working Group on

- GIS/LIS: Current Status and Challenges of Geoinformation Systems, Hannover, 179-190.
- 14 Maderlechner, G., Mayer, H. (1995): Conversion of high level information from scanned maps into geographic information systems. Third International Conference on Document Analysis and Recognition, IEEE, 253-256.
  - 13 Mayer, H. (1995): Automatische, modellbasierte und halbautomatische Straßenextraktion aus Luftbildern. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung 3, 5-12.
  - 12 Mayer, H. (1995): Automatisierte Methoden der digitalen Photogrammetrie zur GIS-Datenerfassung. In: 4. Internationales Anwenderforum 1995, Geoinformationssysteme im Wandel, Siemens Nixdorf Informationssysteme AG, München, 237-243.
  - 11 Steger, C., Glock, C., Eckstein, W., Mayer, H., Radig, B. (1995): Model-based road extraction from images. In: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Birkhäuser, Basel, Schweiz, 275-284.
  - 10 Maderlechner, G., Mayer, H. (1994): Automated acquisition of geographic information from scanned maps for GIS using frames and semantic networks. 12th International Conference on Pattern Recognition, IEEE, 361-363.
  - 9 Mayer, H. (1994): Automatic knowledge based extraction of objects of the real world from scanned maps. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 30 (3/2), 547-554.
  - 8 Mayer, H. (1994): Is the knowledge in map-legends and GIS-models suitable for image understanding? International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 30 (4), 52-59.
  - 7 Klauer, R., Mayer, H. (1993): Automatische Interpretation von gescannten Katasterkarten in Praxis und Forschung. Arbeitskreis kommunaler SICAD Anwender, SICAD-Sonderkurier Nr. 60, Siemens-Nixdorf Informationssysteme AG, München, 121-130.
  - 6 Maderlechner, G., Mayer, H., Heipke, C. (1993): Conversion of scanned cartographic maps to geographic information systems using semantic models. 2nd Annual Symposium on Document Analysis and Information Retrieval, University of Nevada, Las Vegas, 339-347.
  - 5 Mayer, H. (1993): KI-basierte automatische Interpretation von gescannten Karten. In: 3. Intern. Anwenderforum, Geoinformationssysteme - Neue Perspektiven, Siemens Nixdorf Informationssysteme AG, München, Fachzentrum Geo-Informationssysteme, 675-684.
  - 4 Mayer, H., Heipke, C., Maderlechner, G. (1992): Knowledge-based interpretation of scanned large-scale maps using multi-level modelling. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 29 (B3/III), 578-585.
  - 3 Mayer, H. (1991): Integration von digitalen Geländemodellen in hybride graphische Systeme. In: Geo-Informatik, Siemens AG, München, 119-125.
  - 2 Mayer, H. (1991): Scannen von Vorlagen und Konvertierung von Rasterdaten in Vektordaten. Fünfte Informationsveranstaltung über die Graphische Datenverarbeitung

der Bayerischen Vermessungsverwaltung, Bayerisches Landesvermessungsamt, München, 105-132.

- 1 Mayer, H. (1990): Integration des Digitalen Geländemodelles HIFI-88 in SICAD-HYGRIS. SICAD-Kurier Nr. 54, Sonderausgabe zum 74. Geodätentag, Siemens-Nixdorf Informationssysteme AG, München, 105-107.

## VI. Herausgabe und Editierung von wissenschaftlichen Arbeiten

- 14 Caspary, W., Heister, H., Kleim, U.G.F., Mayer, H., Pietzner, G. (Editors) (2018): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reinhardt zum 65. Geburtstag. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München 95.
- 13 Halounova, L., Schindler, K., Limpouch, A., Pajdla, T., Šafář, V., Mayer, H., Oude Elberink, S., Mallet, C., Rottensteiner, F., Brédif, M., Skaloud, J., Stilla, U. (Editors) (2016): XXIII ISPRS Congress, Commission III, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (III-3).
- 12 Halounova, L., Schindler, K., Limpouch, A., Pajdla, T., Šafář, V., Mayer, H., Oude Elberink, S., Mallet, C., Rottensteiner, F., Brédif, M., Skaloud, J., Stilla, U. (Editors) (2016): XXIII ISPRS Congress, Commission III, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XLI-B3).
- 11 Stilla, U., Mayer, H., Schmitt, M., Jutzi, B., Rottensteiner, F. (2012): Editorial – Photogrammetric Image Analysis. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2012 (5): 499-500.
- 10 Mayer, H., Kersten, T. (2011): Editorial – Vier Jahre und 25 Ausgaben. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2011 (4): 201.
- 9 Stilla, U., Rottensteiner, F., Mayer, H., Jutzi, B., Butenuth, M. (Editors) (2011): *Photogrammetric Image Analysis. Lecture Notes in Computer Science* 6952, Springer, Berlin.
- 8 Pfeifer, N., Mayer, H., Hyypä, J. (2010): Editorial – ISPRS Centenary Celebration Issue. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (6): 491.
- 7 Meng, L., Heipke, C., Mayer, H., Jun, C. (2007): Editorial: Interoperation of 3D Urban Geoinformation. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2007 (6): 401-404.
- 6 Stilla, U., Mayer, H., Rottensteiner, F., Heipke, C., Hinz, S. (Editors) (2007): *Photogrammetric Image Analysis. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3/W49A).
- 5 Ebner, H., Heipke, C., Mayer, H., Pakzad, K. (Editors) (2003): *Photogrammetric Image Analysis. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (3/W8).

- 4 Ebner, H., Eckstein, W. Heipke, C., Mayer, H. (Editors) (1999): Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 32 (3-2W5).
- 3 Gülch, E., Mayer, H. (1999): Introduction - Editorial of Special Issue on Image Understanding. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 65 (7): 767.
- 2 Heipke, C., Mayer, H. (Herausgeber) (1999): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner zum 60. Geburtstag. Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München.
- 1 Ebner, H., Heipke, C., Mayer, H. (Editors) (1994): GIS objects from digital images. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Commission III Symposium, Tutorial Notes.

## VII. Reports von Konferenzen und der Arbeit wissenschaftlicher Vereinigungen

- 8 Förstner, W., Mayer, H. (2005): ISPRS Comm. III – Contribution to ISPRS Highlights. ISPRS Highlights 10 (3): 15-17.
- 7 Mayer, H., Hinz, S. (2001): Mustererkennung (DAGM) 2000 und AFPAC 2000 vom 10. bis 15. September in Kiel. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 2001 (1): 58-60.
- 6 Mayer, H. (2000): 75-Jahrfeier des Instituts für Photogrammetrie der Universität Bonn am 13. Juli 2000. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 2000 (6): 438-439.
- 5 Mayer, H., Heuel, S. (2000): European Conference on Computer Vision (ECCV) 2000 in Dublin, Irland. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 2000 (6): 439-441.
- 4 Mayer, H. (1996): Workshop 'The Role of Models in Automated Scene Analysis - 30 August-1 September, Stockholm, Sweden. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 51: 53-54.
- 3 Mayer, H. (1994): ISPRS: Workshop »Semantic Models and Object Recognition«. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 1994 (4): 141.
- 2 Mayer, H. (1994): Seminar 3D-Stadtmodelle, Bonn. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 1994 (3): 111-112.
- 1 Mayer, H., Weidner, U. (1994): 3. ECCV, Stockholm, 2. bis 6. Mai 1994. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 1994 (6): 240.

## VIII. Sonstiges

- 6 Mayer, H., Dorrer, E. (2019): In Memoriam Friedrich Kröll (1940-2019). PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science 87 (5-6), 300.
- 5 Mayer, H., Dorrer, E. (2019): In Memoriam Friedrich Kröll (1940-2019). zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 144 (6), 402.
- 4 Mayer, H., Winck, B. (2014): 3D-Modelle zur Einsatzplanung für mobile Operationen –

Phase II. Wehrwissenschaftliche Forschung, Jahresbericht 2013, 104-105.

- 3 Winck, B., Bartelsen, J., Mayer, H. (2010): 3D-Modelle zur Einsatzplanung für mobile Operationen. Wehrwissenschaftliche Forschung, Jahresbericht 2009, 88-89.
- 2 Mayer, H. (1998): Three dimensional generalization of buildings based on scale-spaces. Report, Chair for Photogrammetry and Remote Sensing, TU München [www.photo.verm.tu-muenchen.de/b3d](http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/b3d).
- 1 Heipke, C., Mayer, H. (1994): Knowledge-based object extraction. In: GIS objects from digital images, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Commission III Symposium, Tutorial Notes.





# Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München

Bisher erschienene Hefte:

Heft 1/1978 (*vergriffen*)

*Schödlbauer, Albert (Bearb.):* Curriculum für den wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München. 53 S.

Heft 2/1978

*Chrzanowski, Adam / Dorrer, Egon (Hrsg.):* Proceedings „Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems“. Workshop held in Munich, Federal Republic of Germany, 1-2 June, 1977. Assisted by *J. McLaughlin*. VII, 181 S.

Heft 3/1978

*Caspary, Wilhelm / Geiger, Axel:* Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser. 62 S.

Heft 4/1979

*Baumann, Eberhard / Caspary, Wilhelm / Dupraz, Hubert / Niemeier, Wolfgang / Pelzer, Hans / Kuntz, Eugen / Schmitt, Günter / Welsch, Walter:* Seminar über Deformationsanalysen, gehalten an der Hochschule der Bundeswehr München. 106 S.

Heft 5/1981

*Torlegård, Kennert:* Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry. 68 S.

Heft 6/1982

*Caspary, Wilhelm / Welsch, Walter (Hrsg.):* Beiträge zur großräumigen Neutrassierung. 271 S.

Heft 7/1982

*Borre, Kai / Welsch, Walter M. (Hrsg.):* International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Survey Control Networks“. Meeting of Study Group 5B, 7th-9th July, 1982, Aalborg University Centre, Denmark. 431 S.

Heft 8/1982

*Geiger, Axel:* Entwicklung und Erprobung eines Präzisionsneigungstisches zur Kalibrierung geodätischer Instrumente. Dissertation. 125 S.

Heft 9/1983

*Welsch, Walter (Hrsg.):* Deformationsanalysen '83. Geometrische Analyse und Interpretation von Deformationen Geodätischer Netze. Beiträge zum Geodätischen Seminar 22. April 1983. 339 S.

Heft 10/1984

*Caspary, Wilhelm / Schödlbauer, Albert / Welsch,*

*Walter (Hrsg.):* 10 Jahre Hochschule der Bundeswehr München. Beiträge aus dem Institut für Geodäsie. 244 S.

Heft 11/1984 (*vergriffen*)

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert (Hrsg.):* Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 23. September 1983. 270 S.

Heft 12/1984

*Schwintzer, Peter:* Analyse geodätisch gemessener Punktlageänderungen mit gemischten Modellen. Dissertation. 159 S.

Heft 13/1984

*Oberholzer, Gustav:* Landespflege in der Flurbereinigung. 81 S.

Heft 14/1984

*Neukum, Gerhard:* Fernerkundung der Planeten und kartographische Ergebnisse. Mit Beiträgen von *G. Neugebauer*. Herausgegeben von *G. Neugebauer*. 102 S.

Heft 15/1984

*Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.):* Satelliten-Doppler-Messungen. Beiträge zum Geodätischen Seminar 24./25. September 1984. 396 S.

Heft 16/1985 (*vergriffen*)

*Szacherska, Maria Krystyna / Welsch, Walter M.:* Geodetic Education in Europe. 234 S.

Heft 17/1986

*Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W.:* A Contribution to 3d-Operational Geodesy. Part 4: The Observation Equations of Satellite Geodesy in the Model of Integrated Geodesy. 190 S.

Heft 18/1985

*Oberholzer, Gustav:* Landespflege in der Flurbereinigung, Teil II. 116 S.

Heft 19/1986 (*vergriffen*)

*Landau, Herbert / Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W.:* GPS Research 1985 at the Institute of Astronomical and Physical Geodesy. 210 S.

Heft 20/1985

Heft 20-1

*Welsch, Walter / Lapine, Lewis A. (Hrsg.):* International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Inertial, Doppler and GPS Measurements for

- National and Engineering Surveys“. Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C, July 1-3, 1985. Band 1. 310 S.
- Heft 20-2  
*Welsch, Walter / Lapine, Lewis A. (Hrsg.):* International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys“. Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C, July 1-3, 1985. Band 2. S. 311 - 634.
- Heft 21/1986  
*Oberholzer, Gustav:* Landespflege in der Flurbereinigung, Teil III. 100 S.
- Heft 22/1987  
*Caspary, Wilhelm / Hein, Günter W. / Schödlbauer, Albert (Hrsg.):* Beiträge zur Inertialgeodäsie. Geodätisches Seminar 25./26. September 1986. 386 S.
- Heft 23/1987  
*Dorner, Egon / Peipe, Jürgen (Hrsg.):* Motografie. Symposium 11./12. März 1986. 285 S.
- Heft 24/1987  
*Neugebauer, Gustav (Hrsg.):* Brenta-Monographie – Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Hochgebirgskartographie. Mit Beiträgen von *D. Beineke, H. C. Berann, W. de Concini, G. Hell, D. Herm, H. Immel, U. Kleim, G. Neugebauer und K. Ringle.* 187 S.
- Heft 25/1987  
*Perelmuter, Avraam:* Beiträge zur Ausgleichung geodätischer Netze. 75 S.
- Heft 26/1987  
*Ellmer, Wilfried:* Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderungen eines Großturbinentisches. Dissertation. 109 S.
- Heft 27/1988  
*Heister, Hansbert:* Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente. Habilitationsschrift. 213 S.
- Heft 28/1987  
*Paßberger, Ernst H.:* Systemstudie zur Sicherung ökologischer Vorrangflächen mittels Bodenordnung in Bayern / System study for the protection of ecological priority areas by means of Land rearrangement in Bavaria. Dissertation. 186 S.
- Heft 29/1987  
*Glasmacher, Hans:* Die Gaußsche Ellipsoid-Abbildung mit komplexer Arithmetik und numerischen Näherungsverfahren. Dissertation. 131 S.
- Heft 30/1987  
*Zhang, Yan:* Beiträge zum Entwurf von optimalen Beobachtungsplänen für tektonische Überwachungsnetze. Dissertation. 151 S.
- Heft 31/1988  
*Lechner, Wolfgang:* Untersuchung einer kreiselorientierten Landfahrzeug-Navigationsanlage im Hinblick auf geodätische Anwendungen und Möglichkeiten der Höhenübertragung. Dissertation. 165 S.
- Heft 32/1988  
*König, Rolf:* Zur Fehlertheorie und Ausgleichung inertialer Positionsbestimmungen. Dissertation. 143 S.
- Heft 33/1988  
*Borutta, Harald:* Robuste Schätzverfahren für geodätische Anwendungen. Dissertation. 161 S.
- Heft 34/1988  
*Landau, Herbert / Hehl, Klaus / Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W. / Reilly, Ian W.:* Operational Geodesy Software Packages. 325 S.
- Heft 35/1988  
*Oberholzer, Gustav / Paßberger, Ernst:* Landespflege in der Flurbereinigung, Teil IV. 153 S.
- Heft 36/1988  
*Landau, Herbert:* Zur Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Softwareentwicklung und Analyse. Dissertation. 287 S.
- Heft 37/1989  
*Eissfeller, Bernd:* Analyse einer geodätischen raumstabilisierten Inertialplattform und Integration mit GPS. Dissertation. 327 S.
- Heft 38/1990 (*vergriffen*)  
Heft 38-1  
*Schödlbauer, Albert (Hrsg.):* Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil I: Global Positioning System. 352 S.
- Heft 38-2  
*Schödlbauer, Albert (Hrsg.):* Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil II: Nivellement. Teil III: Vermessungskreisel. S. 353 - 551.
- Heft 39/1989  
*Kersting, Norbert / Welsch, Walter (Hrsg.):* Rezente Krustenbewegungen. Seminar 8./9. Juni 1989. 307 S.
- Heft 40/1989  
*Oberholzer, Gustav:* Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung. 214 S.
- Heft 41/1990  
*Hein, Günter W. / Hehl, Klaus / Eissfeller, Bernd / Ertel, Michael / Jacoby, Wolfgang / Czerek, Dirk:* On Gravity Prediction Using Density and Seismic Data. 148 S.
- Heft 42/1992  
*Kersting, Norbert:* Zur Analyse rezenter Krustenbewe-

gungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. Dissertation. V, 246 S.

Heft 43/1992

*Hehl, Klaus:* Bestimmung von Beschleunigungen auf einem bewegten Träger durch GPS und digitale Filterung. Dissertation. XII, 206 S.

Heft 44/1992

*Oswald, Wolfgang:* Zur kombinierten Ausgleichung heterogener Beobachtungen in hybriden Netzen. Dissertation. 128 S.

Heft 45/1993

*Institut für Geodäsie (Hrsg.):* Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 12.-14. Mai 1993. 314 S.

Heft 46/1994

*Brunner, Kurt / Peipe, Jürgen (Hrsg.):* Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. 254 S.

Heft 47/1994

Heft 47-1

*Thiemann, Karl-Heinz:* Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Dissertation. Teil I: Renaturierungsleitbild, Naturschutzverfahren. XXXVI, 384 S.

Heft 47-2

*Thiemann, Karl-Heinz:* Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Dissertation. Teil II: Planungsrechtliche Aspekte. XXXVI, S. 385 - 572.

Heft 48/1994

*Schwartz, Christian:* Experimente zur GPS-gestützten Aerotriangulation unter besonderer Berücksichtigung systematischer Einflüsse. Dissertation. VIII, 192 S.

Heft 49/1995

*Scheuring, Robert:* Zur Qualität der Basisdaten von Landinformationssystemen. Dissertation. 126 S.

Heft 50/1997

*Welsch, Walter M. / Lang, Martin / Miller, Maynard M. (Hrsg.):* Geodetic Activities, Juneau Icefield, Alaska, 1981-1996. 268 S.

Heft 51/1996

*Blomenhofer, Helmut:* Untersuchungen zu hochpräzisen kinematischen DGPS-Echtzeitverfahren mit besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Fehlereinflüsse. Dissertation. X, 168 S.

Heft 52/1997

*Wang, Jian Guo:* Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung. Dissertation. XV, 138 S.

Heft 53/1996

*Chen, Guoping:* Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Zeitbereich. Dissertation. III, 128 S.

Heft 54/1997

*Dold, Jürgen:* Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. Dissertation. 140 S.

Heft 55/1997

*Eissfeller, Bernd:* Ein dynamisches Fehlermodell für GPS Autokorrelationsempfänger. Habilitationsschrift. XII, 182 S.

Heft 56/1997

*Sutor, Thomas:* Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Spektralbereich. Dissertation. 123 S.

Heft 57/1997

*Oberholzer, Gustav:* Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung, Teil II. 186 S.

Heft 58/1997

*Zhong, Detang:* Datumsprobleme und stochastische Aspekte beim GPS-Nivellement für lokale Ingenieurnetze. Dissertation. 160 S.

Heft 59/1997

*Jiang, Ting:* Digitale Bildzuordnung mittels Wavelet-Transformation. Dissertation. II, 136 S.

Heft 60/2000

Heft 60-1

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.):* 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 1: Wissenschaftliche Beiträge und Berichte. 331 S.

Heft 60-2

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.):* 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 2: Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen. 113 S.

Heft 60-3

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.):* 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 3: Aus dem Leben des Instituts. 149 S.

Heft 61/1998

*Cui, Tiejun:* Generierung hochwertiger Digitaler Geländemodelle aus analogen Karten mittels Mathematischer Morphologie. Dissertation. 188 S.

Heft 62/1999

*Brunner, Kurt / Welsch, Walter M. (Hrsg.):* Hochgebirgs- und Gletscherforschung. Zum 100. Geburtstag von Richard Finsterwalder. 114 S.

Heft 63/1999

*Fosu, Collins:* Astrogeodetic Levelling by the Combination of GPS and CCD Zenith Camera. Dissertation. 155 S.

Heft 64/1999

*Werner, Wolfgang:* Entwicklung eines hochpräzisen DGPS-DGLONASS Navigationssystems unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolites. Dissertation. 226 S.

Heft 65/1999

*Krack, Klaus:* Dreizehn Aufgaben aus der Landesvermessung im Geographischen Koordinatensystem. 84 S.

Heft 66/2000

*Joos, Gerhard:* Zur Qualität von objektstrukturierten Geodaten. Dissertation. 150 S.

Heft 67/2000

*Sternberg, Harald:* Zur Bestimmung der Trajektorie von Landfahrzeugen mit einem hybriden Meßsystem. Dissertation. 158 S.

Heft 68/2000

*Oberholzer, Gustav:* Die Weiterentwicklung der Kulturlandschaft. Landespflege in der Flurbereinigung, Teil V. 150 S.

Heft 69/2000

*Hollmann, Rolf:* Untersuchung von GPS-Beobachtungen für kleinräumige geodätische Netze. Dissertation. 350 S.

Heft 70/2001

*Roßbach, Udo:* Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS. Dissertation. 167 S.

Heft 71/2001

*Beineke, Dieter:* Verfahren zur Genauigkeitsanalyse für Altkarten. Dissertation. 155 S.

Heft 72/2001

*Oehler, Veit:* Entwicklung eines „end-to-end“ Simulators zur Satellitennavigation unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolite gestützten GNSS-Landesystemen. Dissertation. 212 S.

Heft 73/2001

*Schüler, Torben:* On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation. Dissertation. 370 S.

Heft 74/2001

*Neudeck, Stefan:* Zur Gestaltung topografischer Karten für die Bildschirmvisualisierung. Dissertation. 131 S.

Heft 75/2002

*Shingareva, Kira B. / Dorrer, Egon:* Space Activity in Russia – Background, Current State, Perspectives. 135 S.

Heft 76/2002

*Tiemeyer, Bernd:* Performance Evaluation of Satellite Navigation and Safety Case Development. Dissertation. 151 S.

Heft 77/2004

*Shi, Wei:* Zum modellbasierten Austausch von Geodaten auf Basis XML. Dissertation. 115 S.

Heft 78/2004

*Plan, Oliver:* GIS-gestützte Verfolgung von Lokomotiven im Werkbahnverkehr. Dissertation. 115 S.

Heft 79/2004

*Ebner, Matthias:* Ein Beitrag zur monetären Bewertung von digitaler Netzinformation in Versorgungsunternehmen. Dissertation. 107 S.

[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 80/2005

*Forstner, Gustav:* Längenfehler und Ausgangsmeridiane in alten Landkarten und Positionstabellen. Dissertation. 319 S.

Heft 81/2006

*Dutescu, Eugen:* Digital 3D Documentation of Cultural Heritage Sites Based on Terrestrial Laser Scanning. Dissertation. 140 S.

Heft 82/2007

*Schäuble, Doris:* Nutzungstausch auf Pachtbasis als neues Instrument der Bodenordnung. Dissertation. 176 S.

Heft 83/2008

*Pink, Sönke:* Entwicklung und Erprobung eines multifunktionalen Geo-Sensornetzwerkes für ingenieur-geodätische Überwachungsmessungen. Dissertation. 180 S.

Heft 84/2009

*Gräfe, Gunnar:* Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. Dissertation. 177 S.

Heft 85/2010

*Heichel, Wolfgang:* Chronik der Erschließung des Karakorum. Teil II – Central Karakorum I. 460 S.

Heft 86/2010

*Riesner, André:* Möglichkeiten und Grenzen der Bewegung von Landentwicklungsprozessen und deren Nachhaltigkeit. Dissertation. 222 S.

Heft 87/2012

*Beineke, Dieter / Heunecke, Otto / Horst, Thomas / Kleim, Uwe G. F. (Hrsg.):* Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Brunner anlässlich des Ausscheidens aus dem aktiven Dienst. 328 S.

Heft 88/2012

*Lüdecke, Cornelia / Brunner, Kurt (Hrsg.):* Von A(ltenburg) bis Z(eppelin). Deutsche Forschung auf Spitzbergen bis 1914. 100 Jahre Expedition des Herzogs Ernst II. von Sachsen-Altenburg. Tagung 2011 des Fachausschusses Geschichte der Meteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft und des Arbeitskreises Geschichte der Polarforschung der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung, 24.-25. September 2011, Naturkundliches Museum Mauritianum, Altenburg. 120 S.

Heft 89/2012

*Hinz, Silvia Arabella:* Ganzheitliches Wertschöpfungsmodell der Waldflurbereinigung und deren Effizienzsteigerung. Dissertation. 257 S.

Heft 90/2015

*Krack, Klaus / Oberholzer, Gustav:* Die Ostausrichtung der mittelalterlichen Kirchen und Gräber. 194 S.

Heft 91/2015

*Strübing, Thorsten:* Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Dissertation. 182 S.

Heft 92/2016

*Soboth, Andrea:* Gestaltete lokale Veränderungsprozesse – Change Management als neues Instrument der Landentwicklung. Dissertation. 226 S.  
[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 93/2017

*Hendricks, Andreas:* Bodenrichtwertermittlung. Habilitationsschrift. 244 S.  
[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 94/2018

*Glabsch, Jessica:* Konzeption und Realisierung kosteneffizienter GNSS-Monitoring-Systeme für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen. Dissertation. 156 S.

Heft 95/2018

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Kleim, Uwe G. F. / Mayer, Helmut / Pietzner, Gisela (Hrsg.):* Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reinhardt zum 65. Geburtstag. 181 S.

Heft 96/2019

*Krack, Klaus / Oberholzer, Gustav:* Die Natur der Bienen und die dringend notwendige Umgestaltung unserer Agrarlandschaft – ein Vorschlag. 220 S.  
[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 97/2020

*Hesse, Franziska:* Evaluation der Kommunikation in Flurneuordnungsverfahren an Beispielen in Bayern. Dissertation. 230 S.

Heft 98/2023

*Wehner, Andreas:* Entwicklung und Erprobung von Systemen zur automatisierten präzisen Punktabsteckung. Dissertation. 156 S.

Heft 99/2023

*Pimpi, Julian:* Rapid Prototyping für Anwendungen in der Ingenieurgeodäsie. Dissertation. 166 S.

Heft 100/2024

*Heister, Hansbert / Liebl, Wolfgang / Stephani, Manfred (Hrsg.):* Dokumentation geodätischer und photogrammetrischer Arbeiten in Resafa / Sergiupolis, Syrien im Zeitraum 2000 – 2010.

Heft 101/2024

*Reinhardt, Wolfgang / Huang, Hai (Hrsg.):* Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer zum 60. Geburtstag.

Heft 89/2012

*Hinz, Silvia Arabella:* Ganzheitliches Wertschöpfungsmodell der Waldflurbereinigung und deren Effizienzsteigerung. Dissertation. 257 S.

Heft 90/2015

*Krack, Klaus / Oberholzer, Gustav:* Die Ostausrichtung der mittelalterlichen Kirchen und Gräber. 194 S.

Heft 91/2015

*Strübing, Thorsten:* Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Dissertation. 182 S.

Heft 92/2016

*Soboth, Andrea:* Gestaltete lokale Veränderungsprozesse – Change Management als neues Instrument der Landentwicklung. Dissertation. 226 S.  
[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 93/2017

*Hendricks, Andreas:* Bodenrichtwertermittlung. Habilitationsschrift. 244 S.  
[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 94/2018

*Glabsch, Jessica:* Konzeption und Realisierung kosteneffizienter GNSS-Monitoring-Systeme für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen. Dissertation. 156 S.

Heft 95/2018

*Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Kleim, Uwe G. F. / Mayer, Helmut / Pietzner, Gisela (Hrsg.):* Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reinhardt zum 65. Geburtstag. 181 S.

Heft 96/2019

*Krack, Klaus / Oberholzer, Gustav:* Die Natur der Bienen und die dringend notwendige Umgestaltung unserer Agrarlandschaft – ein Vorschlag. 220 S.  
[nicht in gedruckter Form, nur digital erschienen]

Heft 97/2020

*Hesse, Franziska:* Evaluation der Kommunikation in Flurneuerordnungsverfahren an Beispielen in Bayern. Dissertation. 230 S.

Heft 98/2023

*Wehner, Andreas:* Entwicklung und Erprobung von Systemen zur automatisierten präzisen Punktabsteckung. Dissertation. 156 S.

Heft 99/2023

*Pimpi, Julian:* Rapid Prototyping für Anwendungen in der Ingenieurgeodäsie. Dissertation. 166 S.

Heft 100/2024

*Heister, Hansbert / Liebl, Wolfgang / Stephani, Manfred (Hrsg.):* Dokumentation geodätischer und photogrammetrischer Arbeiten in Resafa / Sergiupolis, Syrien im Zeitraum 2000 – 2010.

Heft 101/2024

*Huang, Hai / Reinhardt, Wolfgang (Hrsg.):* Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer zum 60. Geburtstag.