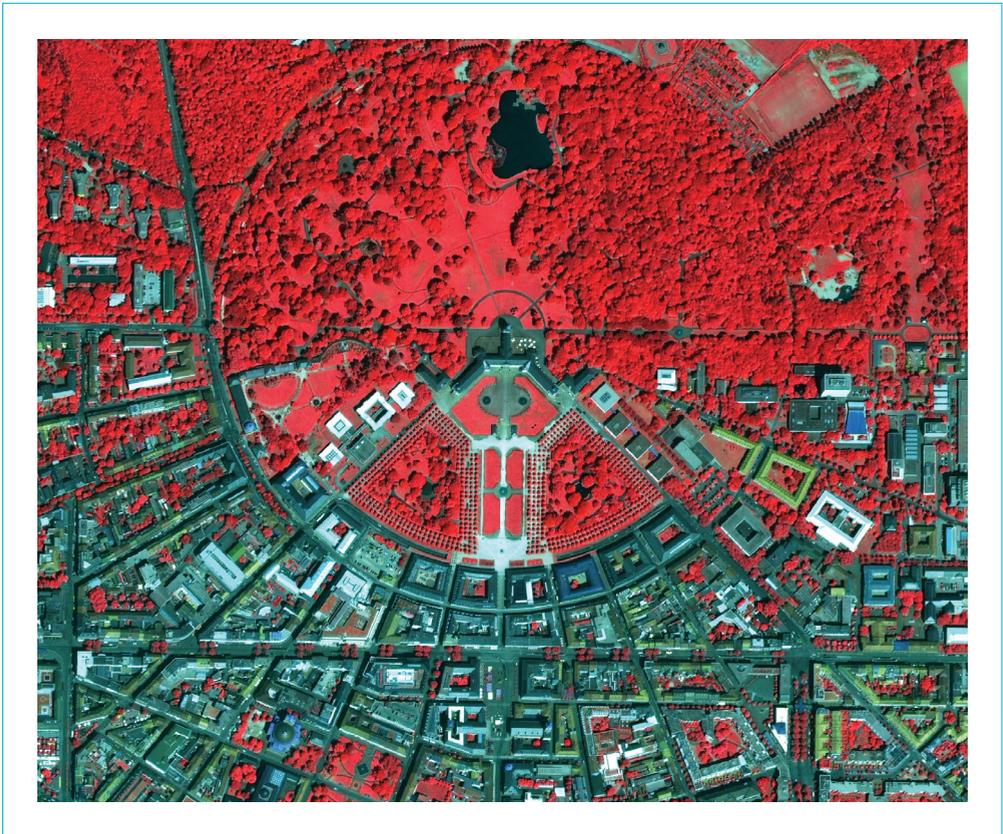


GEODÄTISCHES INSTITUT (HRSG.)
ZUSAMMENGESTELLT VON KURT SEITZ

Festschrift zur 150-Jahr-Feier
des Geodätischen Instituts (1868 - 2018)



Geodätisches Institut (Hrsg.)
Zusammengestellt von Kurt Seitz

**Festschrift zur 150-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts
(1868 - 2018)**

Karlsruher Institut für Technologie
Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik
2018,2

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buches.

Festschrift zur 150-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts (1868 - 2018)

Geodätisches Institut (Hrsg.)
Zusammengestellt von Kurt Seitz

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.

Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

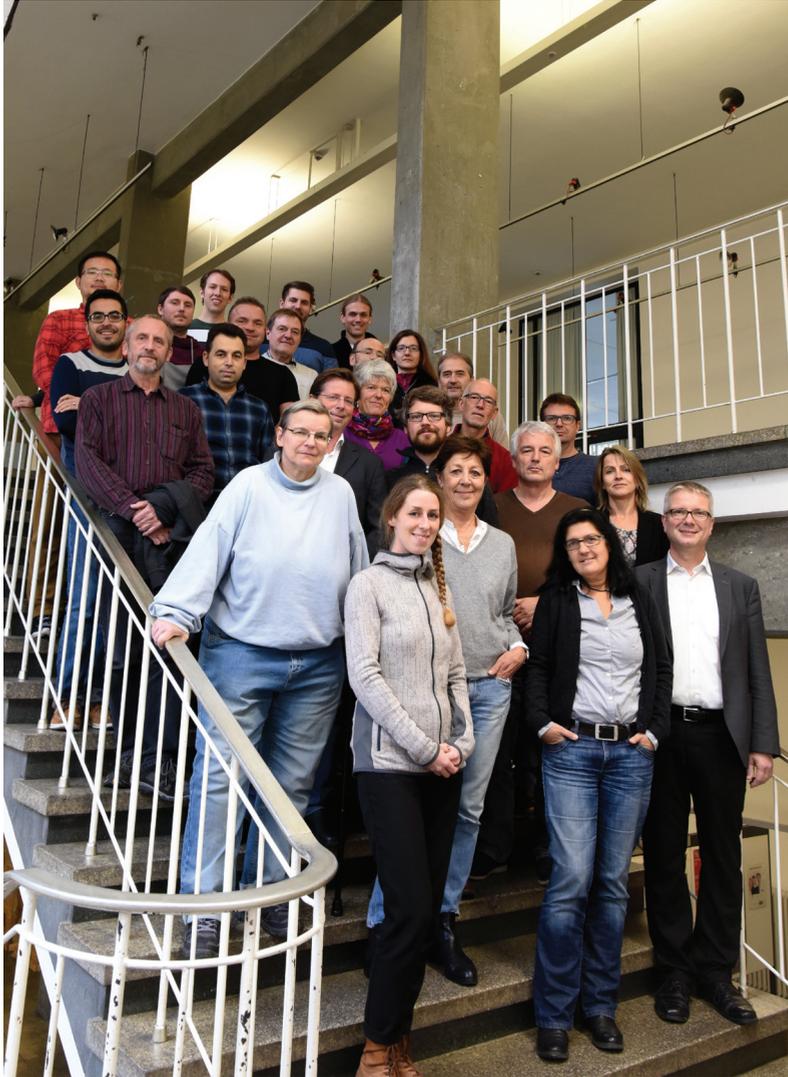
ISSN 1612-9733

ISBN 978-3-7315-0856-4

DOI 10.5445/KSP/1000086360

FESTSCHRIFT
ZUR
150-JAHR-FEIER
DES
GEODÄTISCHEN INSTITUTS
DES
INSTITUTS FÜR TECHNOLOGIE
(KIT)

30. NOVEMBER 2018



Das Institutsteam im Jubiläumsjahr 2018



Alexander Wanner, Vizepräsident für Lehre und akademische Angelegenheiten des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Grußwort

anlässlich 150 Jahre Geodätisches Institut Karlsruhe (GIK)
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Kolleginnen und Kollegen,

das Jahr 2018 ist ein Jubiläumsjahr für Geodätinnen und Geodäten in Baden-Württemberg. Bereits im Mai feierte die Landesvermessung Baden-Württemberg ihr 200-jähriges Bestehen mit einem Festakt und zahlreichen Veranstaltungen. Am KIT knüpfen wir nun an diese Feierlichkeiten an, indem wir das Jubiläum eines der ältesten geodätischen Institute Deutschlands begehen. Wir blicken zurück auf stolze 150 Jahre, die seit der Berufung von Wilhelm Jordan zum Professor für Geodäsie an der Polytechnischen Schule in Karlsruhe im Jahr 1868 vergangen sind. Mit dieser Berufung waren die Voraussetzungen zur Gründung eines Geodätischen Instituts gegeben, in welchem Lehre und Forschung sowie deren enge Verbindung bereits von Anfang an in großem Maße gefördert wurden.

Wenn wir einen Blick auf die Geodäsie im 19. Jahrhunderts werfen, so wird erkennbar, dass sie schon damals wesentliche Beiträge zu wichtigen gesellschaftlichen Aufgaben leistete. In der Festschrift der Technische Hochschule in Karlsruhe 1892 zum Jubiläum der vierzigjährigen Regierung des Großherzogs Friedrich von Baden ist unter anderem nachzulesen, dass die hiesige Professur in besonderem Maße bei der Herstellung einer Bodenseekarte sowie bei einer Längsschnittuntersuchung zur Senkung des Konstanzer Bodenseepiegels beteiligt war. Heute sind Geodät*innen und Geoinformatiker*innen in Stadtplanung und Stadtentwicklung, bei der Navigation und beim Vernetzen von Daten genauso gefragt wie bei klassischen

Vermessungen und Grenzfestlegungen. Die Herausforderungen der Zukunft in so wichtigen Bereichen wie Umweltschutz, Raumplanung, Bauwesen und vielen mehr wären ohne qualifizierte, raumbezogene Informationen sicherlich nicht zu bewältigen.

Das Geodätische Institut am KIT bereitet seine Studierenden durch einen hohen Praxisbezug und eine starke Forschungsorientierung optimal auf spätere Tätigkeitsbereiche vor. Der frühe Praxisbezug ist wesentliches Merkmal des Studiengangs „Geodäsie und Geoinformatik“ am KIT – und er hat Tradition: Seit über 125 Jahren finden im Schwarzwald die sogenannten Hauptvermessungsübungen statt, bei denen die Studierenden in drei aufeinander aufbauenden Modulen praxisnahe Projekte in verschiedenen Schwierigkeitsgraden bearbeiten. Die Master-Studierenden stellen sich dabei der anspruchsvollen Aufgabe, eine außerordentlich präzise Vermessung der Linachtalsperre bei Vöhrenbach im Südschwarzwald durchzuführen.

Das Lehrkonzept der Geodäsie und Geoinformatik fügt sich damit hervorragend in die Lehrphilosophie des KIT ein: Diese verfolgt das Ziel, junge Menschen auf der Basis einer intensiven wissenschaftlichen und forschungsorientierten Ausbildung und des überfachlichen Kompetenzerwerbs zu qualifizieren. Unsere Studierenden sollen am Ende ihres Studiums in der Lage sein, eigenständig aktuelle und zukünftige Probleme zu identifizieren, komplexe Fragestellungen zu bearbeiten und mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Lehre und Studium am KIT sind dabei geprägt von einer studierendenorientierten Lehr- und Lernkultur mit einer offenen und kreativen Lehr- und Lernumgebung.

Ich freue mich sehr, dass das herausragende Lehrkonzept der Geodäsie und Geoinformatik und im Besonderen die jährlich durchgeführten Hauptvermessungsübungen im vergangenen Jahr entsprechend gewürdigt wurden: Das Betreuerteam der Hauptvermessungsübung hat 2017 für seinen besonderen Einsatz und die semester- und studiengangübergreifende Lehre den Fakultätslehrpreis der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften erhalten. Hierzu gratuliere ich Ihnen nochmals sehr herzlich!

Für die Zukunft wünsche ich dem Geodätischen Institut und Ihnen, liebe Kolleginnen und Kollegen, alles Gute. Bleiben Sie engagiert, kreativ und innovativ – und gleichzeitig Ihrer langjährigen Tradition verpflichtet.

Gestalten Sie Zukunft auch weiterhin aus Tradition heraus!

Karlsruhe, November 2018

Ihr
Alexander Wanner



Präsident Luz Berendt, Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung, Stuttgart

Grußwort

anlässlich 150 Jahre Geodätisches Institut Karlsruhe (GIK)
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,
sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

150 Jahre Geodätisches Institut Karlsruhe (GIK) – und schon spulen wir in Gedanken zu den Anfängen zurück, beispielsweise zu Johann Gottfried Tulla, Landvermesser, Rheinbegradiger und Mitbegründer der Polytechnischen Schule als Vorgängerin der Karlsruher Universität und des jetzigen Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Oder wir erinnern uns an Namen wie beispielsweise Wilhelm Jordan. Jordan, der als erster Professor 1868 dem Ruf auf den Lehrstuhl "Praktische Geometrie und höhere Geodäsie" folgte und damit den Startschuss für das inzwischen älteste geodätische Institut Deutschlands gab. Jordan, der den "Deutschen Geometer Verein" mitinitiierte, den heutigen DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. und das Handbuch der Vermessungskunde zusammenstellte, das immer wieder aktualisiert als "Jordan-Eggert-Kneissl" bis zum heutigen Tag im Bücherschrank von Geodätinnen und Geodäten zu finden ist.

Sowohl Tulla als auch Jordan verzahnten die Wissenschaft und Lehre mit den öffentlichen Aufgaben der Geodäsie. So brachten sie sich zum Beispiel bei der Triangulation, den Präzisionsnivellements oder der anschließenden Katastervermessung des damaligen Großherzogtums Baden ein. Kooperationen dieser Art werden bis zum heutigen Tag zwischen GIK und dem

Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL) gepflegt. Lehrbeauftragte geben einen Vorgeschmack auf die Berufspraxis in Flurneuordnung und Landentwicklung, Stadtplanung und -entwicklung, Liegenschaftskataster, Bodenordnung, Ingenieurvermessung, Landesvermessung oder Kartografie. Gemeinsame Forschungsprojekte stützen die Verwaltung bei Entscheidungen zu Messanordnungen und -abläufen oder untersuchen unter anderem den Mehrwert, wenn UAVs in Flurneuordnungen eingesetzt werden. Personell und praxisnah unterstützt das LGL die Hauptvermessungsübungen, zu denen die Studierenden nach Furtwangen im Schwarzwald fahren – und das schon seit 1892. In Projektarbeiten dürfen sie dort das wissenschaftlich Erlernte in der Praxis erproben.

150 Jahre GIK beinhalten Entwicklung, Fortschritt und Wandel. Genauso wie beispielsweise das metrische Maßsystem dem badischen Fuß folgte, wie Polarverfahren, Polygonzüge, Orthogonal- und Linearaufnahmen von satellitengestützten Messanordnungen mit 5-Parameter-Transformationen und Komplexausgleichungen abgelöst wurden, wie Sensorik und mehrdimensionale Datenmodelle zu einer aussagekräftigen und auswertbaren Virtual Reality führen, genauso entwickelte sich auch das Geodätische Institut weiter und nahm zukunftsweisende Lerninhalte auf. Die neuen Lehrstühle Geoinformatik, Physikalische und Satellitengeodäsie sowie Geodätische Messtechnik und Sensorik erforschen neue Methoden und Werkzeuge zur Erfassung, Modellierung, Verwaltung, Visualisierung und Analyse raumbezogener Daten.

In der Verwaltung wie im freien Beruf benötigen wir heutzutage gerade diese Experten, die Geodaten miteinander verknüpfen können. Zukünftig sind bei der Digitalisierung immer mehr Spezialisten gefragt, die Daten in einen Raumbezug stellen und visualisieren können und die interdisziplinär Antworten und Lösungen für agrarstrukturelle, gesellschafts-, wirtschafts- und umweltpolitische Szenarien finden. Das GIK forscht, lehrt und engagiert sich interdisziplinär als Partner der Angewandten Geowissenschaften sowie als Bindeglied zwischen den Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften. Ich bin sicher, die Absolventinnen und Absolventen des GIK sind bestens auf die Herausforderungen von morgen vorbereitet.

Herzlichen Glückwunsch für 150 Jahre Tradition mit Zukunft.

Stuttgart, November 2018

Ihr
Luz Berendt



Prof. Steffen Schön, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover

Grußwort

zu 150 Jahre Geodätisches Institut Karlsruhe

„... ausgestattet mit allen Zügen geodätischer und menschlicher Charaktere ihrer Urheber.“

Professor Wilhelm Jordans Zitat aus dem Vorwort zur vierten Auflage des ersten Bandes seines *Handbuchs der Vermessungskunde*, die er im Juli 1895 in Hannover herausbrachte und dem 100-jährigen Jubiläum der Methode der kleinsten Quadrate nach Gauß widmete, lässt sich gut auf das Geodätische Institut Karlsruhe übertragen. Die vielseitigen theoretischen und praktischen Arbeiten, Expeditionen und Sondervermessungen, technischen Entwicklungen und herausragende Infrastrukturen, das Studien- und Weiterbildungsangebot in Geodäsie und Geoinformatik, über die in dieser Festschrift berichtet werden und die in verschiedenen Facetten beleuchtet und gewürdigt werden, spiegeln das Engagement der Lehrenden und Forschenden in der 150-jährigen Geschichte des Geodätischen Instituts Karlsruhe wider.

Die Frage nach dem richtigen Umfang und Inhalt in der Lehre begleiten die 150-jährige Geschichte, in der eine typische Karlsruher Schule entstanden ist. Fragen der Ausbildung und Sichtbarkeit sind heute genau so aktuell wie zu Zeiten Jordans. Jordan rechtfertigt, dass der Ingenieur in der gewöhnlichen Praxis unmittelbar nur einen sehr geringen Teil der theoretischen Inhalte, welche auf der polytechnischen Hochschule gelehrt würden, brauche, doch dass nur das Studium dieser Wissenschaften Techniker davor bewahre, ihr Fach als Handwerk zu betreiben. Heute bedeutet dies, Geodäsie und das Studium in der Öffentlichkeit sichtbar zu vertreten. Ich selbst hatte während einer Informationsveranstaltung der Universität für

Oberstufenschüler auf einer spontan angebotenen Führung ans Geodätische Institut motivierende Persönlichkeiten und spannende Projekte kennengelernt. Diese haben dazu beigetragen, dass ich vier Jahre später das Studium dort aufgenommen habe. Betrachten wir das heutige Geodäsie-Studium in Deutschland, so lassen sich zwei große Trends ausmachen: Ein Trend zielt auf die Internationalisierung der Lehre. An fast allen Standorten gibt es englischsprachige Lehrangebote in unterschiedlichen Varianten und Ausführungen. Eine zweite Entwicklung ist die große Nachfrage nach Möglichkeiten zur Weiterbildung.

„Als unmittelbar zu messende Größe kommen hier nur in Betracht Längengrößen und Winkelgrößen, weil sich die Bestimmung aller anderen geometrischen Größen hierauf zurückführen lässt.“ So leitet Wilhelm Jordan in die erste Auflage des ersten Bandes *Handbuch der Vermessungskunde* ein, das er 1877 in Karlsruhe verfasste. Die in den 1880er Jahren in Karlsruhe von Heinrich Hertz erfolgreich durchgeführten Untersuchungen zu elektromagnetischen Wellen haben die Messtechnik verändert. Heute sind elektromagnetische Wellen Grundlage der Mehrheit der geodätischen Messverfahren, sei es Globale Satellitennavigationsverfahren wie GPS oder Galileo, Verfahren der Very Long Baseline Interferometrie oder Radarverfahren wie InSAR. Allerdings spielt die Geometrie des Vermessungs- oder Navigationsproblems weiterhin eine entscheidende Rolle. Sie wird beispielsweise subsumiert in den Dilution of Precision (DOP) Faktoren für die Qualitätsabschätzung der GPS-Positionierung und ihre Kenntnis ist entscheidend für die Weiterentwicklung von Messverfahren und Auswertansätzen. Zukünftig stehen neue Messverfahren zur Verfügung, die vermehrt quantenphysikalische Zusammenhänge nutzen, wie es bei den für geodätische Weltraumverfahren wichtigen Atomuhren jetzt schon der Fall ist. Beschleunigungsmessungen können mit kalten Atomen als Prüfmasse ausgeführt werden. Erste Prototypen und kommerzielle Instrumente sind erhältlich. Derzeit wird in Praxisversuchen getestet, in welche neue Genauigkeits- oder Stabilitätsbereiche vorgedrungen werden kann und welche neue Lösungen damit ermöglicht werden.

Im Sinne des Leibniz'schen Motto „*Theoria cum praxi*“ wünsche ich dem Geodätischen Institut Karlsruhe und den dort Forschenden und Lehrenden, auch in Zukunft erfolgreich ihren ganz eigenen Beitrag zur Lösung der Fragestellungen und Herausforderungen in der Geodäsie in Forschung und Lehre zu leisten.

Hannover, November 2018

Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Prof. Andreas Eichhorn, Institut für Geodäsie, Technische Universität Darmstadt

Grußwort

zum 150-jährigen Bestehen des Geodätischen Instituts in Karlsruhe

Mit dem Geodätischen Institut in Karlsruhe (GIK) verbinde ich persönlich vor allem die Zeit meiner Ausbildung und Prägung als Geodät. Bei meinem allerersten Kontakt mit der Geodäsie überhaupt wurde ich als noch orientierungsloser Newcomer mit dem sehr präzise formulierten Studienwunsch „*Irgendwas mit Mathematik, aber bitte auch mit Praxisbezug*“ von der zentralen Studienberatung der Universität Karlsruhe (TH) zu einem Gespräch mit Hansjörg Seckel geschickt. Dieser hielt sich erst gar nicht mit langen Vorreden auf, sondern rechnete mit mir gleich einen Polygonzug und erläuterte die Wichtigkeit von Koordinaten und Raumbezug. Das hat mich derart überzeugt, dass ich im Wintersemester 1990 das Studium der Geodäsie aufnahm. Ich habe es nie bereut am GIK studiert zu haben. Das Studium in Karlsruhe bedeutete schon immer eine sehr gelungene Verbindung aus der Vermittlung von ingenieurwissenschaftlichem Grundlagenwissen und hierauf aufbauenden vielfältigen praktischen Vermessungsübungen. Man kann sich sicher sein, dass man nach Durchlaufen der "Karlsruher Schule" bestens für den Arbeitsmarkt gerüstet ist, sowohl für die Verwaltung und Ingenieurbüros als auch für eine mögliche akademische Laufbahn. Ich erinnere mich hier noch sehr gerne an die drei Hauptvermessungsübungen im Schwarzwald, in denen ich von der Katastervermessung bis hin zur Netzplanung und -messung das praktische "Handwerk" des Vermessungsingenieurs von der Pike auf gelernt habe. Die vorab in den Vorlesungen vermittelten theoretischen Grundlagen (z. B. zu Instrumentenfehlern, Korrekturen und Reduktionen) wurden hier wirklich greifbar. Bei mir persönlich stellte sich die Erkenntnis ein, dass projektorientierte Studieninhalte mit einem soliden wissenschaftlichen Unterbau einen

enormen Mehrwert haben. Diese Erkenntnis genießen heute an der Technischen Universität Darmstadt nicht nur meine Geodäsie-Studierenden sondern auch alle Bau- und Umweltingenieure. Messtechnik und Sensorik waren und sind am GIK zentrale Elemente in Forschung und Lehre. Während zu meiner Studienzeit der Fokus primär auf statischen Mess- und Auswerteverfahren mit Einzelmessungen lag, entwickelt sich die Forschung (und auch die Lehre) aktuell hin zur kinematischen Messtechnik mit räumlich und zeitlich hochauflösend abtastenden Multi-Sensorsystemen und zur Verarbeitung von großen Datenmengen (Stichwort "Big Data"). Gleich geblieben ist in Karlsruhe aber nach wie vor das Bestreben, den gesamten Mess- und Auswerteprozess durchgreifend zu verstehen, mathematisch zu beschreiben und damit die Datenqualität zu quantifizieren bzw. letztendlich zu sichern. Das GIK steht für besondere Kompetenz im Bereich der Kalibrierung von Messsystemen und der Entwicklung von Prüfeinrichtungen, der Beschreibung der atmosphärischen Einflüsse und der Modellierung von verbleibenden Messunsicherheiten. In der Messtechnik verbindet man dann mit den Karlsruhern vor allem die Präzisionsvermessung, z. B. im Bereich der Large Volume Metrology, wobei auch eigene Hardwareentwicklungen das Portfolio komplettieren. Ringversuche, Merkblätter und die sehr aktive Mitwirkung in Gremien (z. B. in der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel) befruchten auch andere Standorte und sorgen in der geodätischen Gemeinschaft für einen regen Erfahrungsaustausch.

Als Karlsruher Absolvent übersende ich dem Geodätischen Institut zum 150-jährigen Bestehen meine allerherzlichsten Glückwünsche. Ich wünsche dem GIK auch für die Zukunft viel Erfolg und dass die thematische Vielfalt in Forschung und Lehre und der große praktische Anteil im Curriculum erhalten werden kann. Den Begriff der "Messkunst" habe ich aus Karlsruhe mitgenommen. Er begleitet mich bis heute.

Darmstadt, November 2018

Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn



Prof. Monika Sester, Institut für Kartographie und Geoinformatik,
Leibniz Universität Hannover

Grußwort

zu 150 Jahre Geodätisches Institut Karlsruhe

Von den 150 Jahren Geodätisches Institut habe ich nur einen kleinen Bruchteil miterlebt – ich erinnere mich an die Universität Karlsruhe primär durch mein Studium ab 1981. Eine kurze Zeit konnte ich als wissenschaftliche Assistentin am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung arbeiten – dann erhielt ich eine Mitarbeiterstelle im SFB "Hochgenaue Navigation" in Stuttgart und es zog mich ins "Schwabeländle".

Daher beleuchten meine Erinnerungen die Menschen, die ich im Laufe des Studiums kennenlernen durfte, die mich zweifelsohne geprägt haben und denen ich daher Einiges verdanke.

Es hat mich immer beeindruckt, mit welcher Offenheit und Nähe die Dozenten den Studierenden begegneten – das war mir ein Vorbild und ich hoffe, dass ich es mit meinen Studierenden und Mitarbeitern auch so halte.

Ein paar Erinnerungen – schlaglichtartig:

- Herr Zick: unvergessen die astronomischen Übungen auf dem Messdach, aber auch gelegentliche literarische Einlassungen zum Beispiel zu Arno Schmidt
- Herr Schlemmer und Herr Illner als "Good Cop und Bad Cop" bei der Hauptvermessungsübung
- Herr van Mierlo, der die Vorlesung für die zwei Vertiefer Geodäsie in seinem Büro auf dem Sofa abgehalten hat

- Herr Farkas, der deutlich gemacht hat, wie wichtig Klarheit und Eindeutigkeit auch im scheinbar Kleinen ist – in der Dokumentation von Messprozessen in Feldbüchern
- Frau Marlene Bigott, die charmante Sekretärin, die auch für die Studierenden immer ein offenes Ohr hatte
- Herr Seckel, die "Mutter" der Studenten
- Ralf Bill, bei dem ich noch nicht GIS, aber Ausgleichung lernte
- Rainer Jäger, der mit der linken Hand gleich wieder wegwischte, was er rechts an die Tafel schrieb – und dennoch die Ausgleichung ausgezeichnet vermittelte
- Hartmut Müller, bei dem ich erste Programmiererfahrung mit Lochkarten gewinnen konnte
- Jochen Wiesel, der Herr des fortschrittlichen Bildverarbeitungslabors der Photogrammeter
- Der immer gut gelaunte Charly Kaufmann in seinem kleinen Kabuff
- Unvergessliche Messkampagnen zur photogrammetrischen Bauaufnahme mit Konni Ringle in Rom
- Hans-Peter Bähr, der mich – im Nachhinein – überzeugt hat, dass "nichts ist doofer als Hannover" nicht zutrifft
- Ein Ausflug zu einem Kongress über "Inertial Navigation" nach Stuttgart, der uns Studierende zum ersten Mal in Kontakt mit der internationalen Wissenschaft brachte

Ich erinnere mich gerne an die Mitarbeiter des Geodätischen Instituts in Karlsruhe und fühle mich ihnen verbunden. Später haben sich die Wege immer wieder gekreuzt und ich verfolge die Entwicklungen mit großer Neugier. Ich wünsche dem Geodätischen Institut weiterhin eine gesunde und prosperierende Entwicklung – und viele glückliche Studierende, so wie ich eine war.

Hannover, November 2018

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester

Inhaltsverzeichnis

Grußwort von Alexander Wanner, Vizepräsident für Lehre und akademische Angelegenheiten des KIT	i
Grußwort von Luz Berendt, Präsident des LGL	iii
Grußwort von Prof. Steffen Schön	v
Grußwort von Prof. Andreas Eichhorn	vii
Grußwort von Prof. Monika Sester	ix
Die Vorgeschichte (1825 - 1867)	1
Gustav Oberholzer	
Die Gründerjahre (1868 - 1917)	19
Heinz Draheim	
Zwischen den Kriegen (1918 - 1945)	33
Karl Wieser	
Wiederaufbau (1945 - 1968)	45
Eugen Kuntz	
Die Entwicklung des Geodätischen Instituts (1968 - 1993)	57
Bernhard Heck	
Das Geodätische Institut (1993 - 2018)	71
Martin Breunig, Bernhard Heck, Maria Hennes, Hansjörg Kutterer und Günter Schmitt	
Die Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts (1904 - 1989)	99
Hermann Mälzer	
Kreismessungen am Geodätischen Institut	109
Klaus Lindner	

Forschung am Geodätischen Institut	115
Martin Breunig, Bernhard Heck und Maria Hennes	
Innovationen am Geodätischen Institut	189
Martin Breunig, Bernhard Heck und Maria Hennes	
Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen	229
Maria Hennes	
Das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach (BFO)	255
BFO-Team: Peter Duffner, Thomas Forbriger, Bernhard Heck, Malte Westerhaus, Rudolf Widmer-Schmidrig und Walter Zürn	
Die universitäre Geodäsieausbildung in Karlsruhe – Historie, Gegenwart und Zukunft	275
Michael Illner, Michael Mayer und Martin Breunig	
Die Hauptvermessungsübungen (1868 - 2018)	291
Dieter Möller, Udo Maier, Manfred Juretzko, Martin Vetter und Michael Illner	
GPS-/GNSS-Praktikum – Eine studierendenzentrierte und kompetenzorientierte Lehrveranstaltung im Wandel der Zeit	317
Michael Mayer und Kurt Seitz	
Das Studium Geodäsie und Geoinformatik aus studentischer Sicht	333
Fachschaft Geodäsie und Geoinformatik	
Das Museum des Geodätischen Instituts	337
Norbert Rösch	
Die Bibliothek des Geodätischen Instituts	345
Magda Kästel	
Die personelle Entwicklung am Geodätischen Institut	349
Studentische Ehrungen, soziales Engagement und Auslandsaufenthalte	377

Die Vorgeschichte (1825 - 1867)

Gustav Oberholzer¹

Die Besetzung eines Lehrstuhls für praktische Geometrie und höhere Geodäsie an der Polytechnischen Schule in Karlsruhe im Jahre 1868 bedeutet für diese beiden Fächer einen wichtigen Wendepunkt, denn es endet damit eine Zeit, die durch eine meist deutliche Trennung dieser beiden Zweige der Geodäsie gekennzeichnet war. Werfen wir einen Blick zurück, nicht nur auf die Anfangsjahre der Polytechnischen Schule, die am 7. Oktober 1825 gegründet wurde, sondern auch auf die allmähliche Entwicklung, die zu dieser Gründung führte.

Als Ausübende der praktischen Geometrie finden wir im 18. Jahrhundert die Geometer und Feldmesser, die z. T. freischaffend, z. T. aber auch fest besoldet im Dienste einer Grundherrschaft standen. Aufgaben der Landesvermessung, also der höheren Geodäsie, wurden nur vereinzelt und in geringem Umfang durchgeführt; sie gehörten zum Tätigkeitsbereich der Ingenieure bzw. Trigonometer.

Über das damalige berufliche Wirkungsfeld der Ingenieure, Geometer und Feldmesser gibt ein 1809 von Tulla verfasstes Memoria Aufschluss. Es heißt darin:

„Die Ingenieure haben zu besorgen:

- *den Wasserbau*
 - *den Flußbau,*
 - *den Canalbau,*
 - *den Schleusenbau,*
 - *den Wehrbau,*
 - *den Brückenbau,*
 - *die Austrocknungen,*

¹ Überarbeiteter Beitrag aus der Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts aus dem Jahr 1993

- *das Maschinenwesen*
 - *den Mühlenbau,*
 - *den der Wasserhebungs-Maschinen,*
 - *das Maschinenwesen für Bergwerke und Fabriken,*
- *den Straßenbau,*
- *die Landesvermessungen im Allgemeinen und insbesondere*
 - *die geographischen Vermessungen,*
 - *die topographischen Vermessungen,*
 - *die Renovationen,*
 - *die Teilungen,*
 - *die Grenzberichtigungen,*
 - *die Flußvermessungen,*
 - *das Nivellieren,*
 - *die Markscheidung,*
- *die Muttermaße und Gewichte.*

Die Geometer haben diejenigen Vermessungen zu machen, welche der Ingenieur wegen seiner übrigen Berufsgeschäften nicht selbst besorgen kann; hierher gehören:

- *die Renovationen,*
- *die Vermessung großer Waldungen und überhaupt solcher Distrikte, welche einen sehr großen Aufwand an Zeit erfordern,*
- *die Teilungen größerer und kleinerer Distrikte.*

Die Feldmesser sind gewöhnlich Schullehrer, Handwerksleute oder Landleute, welche von der Geometrie teils mehr, teils weniger Begriffe haben, und werden daher auch meistens nur zur Vermessung und Teilung einzelner Güter-Stücke, jährlichen Allmend-Teilungen usw. gebraucht.“

Entsprechend dem Tätigkeitsbereich war auch die Ausbildung: Die Feldmesser wurden meist durch ältere Kollegen in ihr Handwerk mehr oder weniger gründlich eingeführt. Die Geometer dagegen erlernten die Theorie teils an einem Gymnasium, einem Lyzeum oder einer Universität, teils bei erfahrenen Ingenieuren oder Geometern; die praktischen Kenntnisse erwarben sie in der Regel bei Renovationsmessungen unter der Leitung eines Geometers.



Abb. 1: Johann Gottfried Tulla
(*20.03.1770, +27.03.1828)

Ein Beispiel für die Ausbildung zum Geometer und anschließend zum Ingenieur geben uns die Lehrjahre Johann Gottfried Tullas (siehe Abb. 1), des Mitbegründers unserer Universität, berühmten Schöpfers der Rheinkorrektion und Leiters des badischen Ingenieurwesens. Tulla zeigte als Schüler des Lyzeums in Karlsruhe besondere Neigung zur Mathematik und wählte daher den Beruf des Geometers. Nachdem er vier Jahre lang Unterricht bei einem Ingenieur genommen und die öffentlichen Kollegien in der reinen und angewandten Mathematik und Physik bei Professor Böckmann und Hofrat Wucherer am Lyzeum in Karlsruhe gehört hatte, suchte 1789 „*der Geometrie Beflissene*“ in einer Eingabe an den „*Durchlauchtigsten Markgrafen gnädigsten Fürst und Herrn*“ darum nach, „*ihn in dieser Wissenschaft prüfen zu lassen sowie nach Befund seiner Fähigkeiten in Zahl derer Fürstlichen Geometer aufnehmen und ihm zu seiner Subsistenz einigen Verdienst durch Anweisungen geometrischer Arbeiten zu erteilen.*“ Diese Prüfung wurde von zwei Ingenieuren abgenommen. Sie kamen zum Urteil, dass Tulla „*in der Geometrie und Trigonometrie die nötigen theoretischen Kenntnisse besitze und bey fernerer Application und künftiger Ausübung hinlängliche Fertigkeit erlangen*

werde.“ Tulla bekam 1790 seine erste Anstellung als Geometer, wurde aber vom praktischen Dienst entbunden, damit er sich zum Ingenieur weiterbilden konnte. Mit Unterstützung des Markgrafen wurde Tulla für einige Jahre in die Lehre zu bekannten Ingenieuren außer Landes geschickt und sollte auch durch mannigfache Reisen alle die für seinen zukünftigen Beruf wichtigen Gegenstände kennenlernen. Die Instruktion, die Tulla mit auf den Weg gegeben wurde, zeigt, auf welchen Gebieten der zukünftige Ingenieur sich besonders umsehen musste: *„Bey den Reisen, welche der Geometer Tulla demnächst zur Vervollkommnung seiner mathematischen Kenntnisse vornehmen wird, hat derselbe, nach der bisher erhaltenen Anleitung, und der Bestimmung gemäß, welche ihn dereinst in seinem Vaterland erwartet, seine Beobachtungen vornehmlich auf folgende Gegenstände zu richten:*

- *In der Civilbaukunst, was besondere nützliche mathematische Verhältnisse der Construction des Ganzen, oder einzelner Theile, z. B. der Gewölbe, des Gebälks, des Mauerwerks sodann physische Beschaffenheiten der Materialien, z. B. der Dauerhaftigkeit des Holzwerks, des Mörtels, des Kitts betrifft.*
- *In der Mechanik, besonders was zu den Maschinerien für Bauwesen, Fabriken, Mühlen von allerley Arten, zu Bergwerken, zur Landwirtschaft und dergleichen gehört.*
- *Die Hydraulik und Hydrotechnik nach ihrem ganzen Umfang, folglich mit Schließen, Brücken und anderen Theilen derselben.*
- *Die Salzwerkskunde soviel möglich durch alle Theile derselben, insbesondere die Kenntnis des Innern der Gebirge in Absicht der Salzlager und Quellen und ihrer äußeren Kennzeichen, die Bohrer und andere Mittel zur Aufsuchung des Salzes, die Maschinen zur Ausförderung und dann die Taggebäude zur Gradierung und übrigen Zubereitung derselben, auch worinn ein Land vor dem andern, in Rücksicht seiner Lage oder Seen vorteilhafte Einrichtungen besitzt, die in den hiesigen Fürstlichen Landen angewendet werden können.*
- *Allgemeine Landesvermessungsanstalten sowohl in Absicht der Personen und ihrer Vermessungsarten als auch der zu verfertigten Pläne und wie die verschiedenen Objecte darinn deutlich und am richtigsten ausgedrückt werden.“*

Im 18. und zu Beginn des 19. Jahrhunderts war die Ausbildung der Ingenieure in den deutschen Landen meist sehr individuell und recht unterschiedlich. Sehr oft war das Institut der Geometer *„die Pflanzschule der Ingenieure, aus welcher die meisten der später aufgestellten Bezirksingenieure hervorgegangen sind,“* wie Major Scheffel, ein Mitarbeiter Tullas, es einmal ausdrückte. Technische Schulen, wie in Frankreich die Ecole des ponts et chaussées in Paris und die Ecole des Ingénieurs in Mézières sowie ab 1795 die Ecole polytechnique, die erste Technische Hochschule, die von Anfang an bewusst den technischen Unterricht auf exakt

wissenschaftlicher Grundlage aufbaute und alle technischen Gebiete mit einschloss, waren in den deutschen Staaten des 18. Jahrhunderts noch unbekannt.

Die Anfangsgründe der praktischen Geometrie dagegen wurden im 18. Jahrhundert sowohl an der pfälzischen Landesuniversität Heidelberg als auch an der österreichischen Universität Freiburg – hier seit 1769 mit einem Abschlussdiplom (testimonium legitimum) in der Feldmesskunst – und auch in vielen höheren Schulen gelehrt und durch Feldübungen praktisch veranschaulicht. Hier kamen die künftigen Messkundigen, die Feldmesser, Geometer und Ingenieure, mit den ersten Grundlagen ihres Berufes in Berührung – weit mehr, als dies heute in höheren Schulen und Mittelschulen geschieht.

An dem 1586 in Durlach gegründeten und 1724 nach Karlsruhe verlegten Lyzeum z. B. lehrte seit 1736 Jakob Friedrich Maler reine und angewandte Mathematik, seit 1742 auch Algebra. Vor dieser Zeit war der Unterricht in Mathematik und in den verwandten Fächern nur zeitweilig und oft ohne großen Eifer erteilt worden. Es hing ganz von der Fähigkeit der dazu vorhandenen Lehrer ab. Maler, ein Schüler Johann Bernoullis in Basel, veröffentlichte 1762 ein Werk über "Geometrie und Markscheidkunde", das die praktische Geometrie in übersichtlicher Darstellung behandelte. Dieses Lehrbuch war nicht nur in den Schulen der badischen Lande eingeführt, sondern fand auch darüber hinaus große Verbreitung. Nach dem Tode Malers wurde es noch mehrere Male von dem berühmten Mathematiker Kästner in Göttingen herausgegeben. Maler schreibt im Vorwort zu seinem Werk:

„Dieser Vorbericht ist dazu bestimmt, um zu zeigen, wie die Geometrie der Jugend, sonderlich in den Landschulen, auf eine leichte Art beyzubringen. In dieser Absicht werden wohl die Lehrlinge in drey Classen abzutheilen seyn, indem einige nur das blossе Feldmessen, das ist, ein Feld aufzutragen, auszumessen und zu theilen lernen wollen; andere verlangen auch zu wissen, wie regulaire Figuren gezeichnet werden, wie Linien zu messen, zu denen man nicht kommen kann, und wie man Körper berechnen müsse; und endlich werden einige begierig seyn, nicht nur alles, was in der Geometrie brauchbar ist, zu wissen, sondern auch die Gründe davon einzusehen; alle aber müssen, ehe sie die Geometrie anfangen können, eine ziemliche Fertigkeit in den "Species und Regel de Tri" auch der Rechenkunst haben.“

Maler unterrichtete von 1740 - 1743 auch den Erbprinzen von Baden-Durlach, Karl Friedrich, in Mathematik und Physik und legte so den Grundstein zu dem stetigen Interesse des späteren Markgrafen und ersten Großherzogs von Baden für die Fragen dieser Wissenschaft. Dies zeigte sich auch darin, dass Karl Friedrich unter dem Nachfolger Malers, J. L. Böckmann, den Aufbau des für seine Zeit sehr bedeutenden physikalischen Kabinetts, das auch geodätische Instrumente wie Quadranten, Sextanten und Messtische enthielt, mit allen Mitteln unterstützte.

Auch die gelehrte und kunstverständige Gemahlin Karl Friedrichs, die 1786 verstorbene Markgräfin Caroline Luise, hatte in hohem Maße Interesse an mathematischen und physikalischen Fragen. Der berühmte französische Geodät Cassini de Thury, der 1762 für vierzehn Tage während seiner Arbeiten zur Gradmessung Paris-Wien am markgräflichen Hof in Karlsruhe weilte, berichtet in seiner Reisebeschreibung vom regen Interesse der Markgräfin an seinem Unternehmen. Sie ließ sich sogar von dem großen Gelehrten auf dem Turm des Schlosses die Instrumente und deren Gebrauch erklären und stolz schreibt Cassini de Thury, dass sie während seines Aufenthaltes lernte, Karten zu berechnen und zu konstruieren. Er bemerkt zum Schluss:

„On peut juger de la satisfaction que j'avais de voir une princesse s'amuser de ce qui a alarmé tous les ignorans que j'ai rencontrés dans la suite.“

Markgraf Karl Friedrich bestellte bei dem Durchreisenden eine Reihe von Instrumenten. Ein in der Sammlung des Geodätischen Instituts vorhandener Quadrant von Canivet, Paris, mit der Jahreszahl 1763, mit dem die Markgräfin mehrmals gemessen haben soll und den Karl Friedrich 1804 dem physikalischen Kabinett schenkte, gehört sehr wahrscheinlich zu diesen damals bestellten Instrumenten.

Nachdem 1806 das Großherzogtum Baden seine endgültige Gestalt angenommen hatte, fühlte man die Notwendigkeit einer straffen Organisation des Ingenieurwesens in dem nun beträchtlich vergrößerten Staatsgebiet. Tulla schreibt 1809 in einem Promemoria:

„Gegenwärtig ist kein Zusammenhang des Ganzen, kein gemeinschaftlicher Geist, kein Dienstreglement und nichts was irgend einen Anschein von einer Organisation haben möchte; die Methoden der Messungen sind verschieden; dieses hätte aber noch wenig zu bedeuten, da jede Messung nach geometrischen Grundsätzen geschieht, aber diesem ohngeachtet gibt es doch vollkommener und genauere, und wenig vollkommener und wenig scharfe Methoden der Meßkunst ...“

Über die Bedeutung eines Ingenieur-Corps schreibt er:

„Wenn in einem Staat das Eigenthum des Unterthanen gegen die Angriffe und Überschwemmungen der Ströme und Flüsse gesichert, den Zerstörungen der Eisgänge Einhalt gethan, die Luft durch Austrocknung der Sümpfe verbessert, der Kultur-Zustand durch allgemeine und partielle Entwässerungen und Bewässerungen, die Land und Wasser-Straßen zur Beförderung des Handels zweckmäßig angelegt und endlich die Größe und Grenze des Eigenthums ganzer Gemeinden und einzelner Privaten bestimmt werden sollen, so ist die Leitung und Besorgung dieser Gegenstände Männern zu übertragen, welche ihre ganze Lebenszeit auf solche Gegen-

stände verwenden, und die unter dem Namen Ingenieur in jedem cultivirten Staat bekannt sind.“

Für ein tüchtiges "Ingenieur-Corps" wurde jedoch eine genügende Anzahl gut ausgebildeter Kräfte benötigt. Tulla erkannte deshalb frühzeitig, dass die Gründung einer Ingenieurschule unumgänglich war. In einem Schreiben der Direktion des Wasser- und Straßenbaues aus dem Jahre 1819 heißt es dazu:

„Der Wasser- und Straßen-Bau nebst den Landesvermessungen in ihrem ganzen Umfange sind anerkannt wichtige Gegenstände einer jeden Staats-Administration, und die Beziehung auf die geographische und hydrographische Lage des Großherzogthums für den diesseitigen Staat von besonderem Interesse. Die beym Wasser- und Straßen-Bau auszuführenden Arbeiten und der damit verbundene Aufwand machen die Aufstellung vollkommen gebildeter Wasser- und Straßen-Baumeister, Trigonometer und Geometer für die Staats-Oekonomie zum unerläßlichen Bedingniß. Da die Ingenieure und Geometer weder auf Universitäten, noch in sonstigen Anstalten gebildet werden können, und auch nicht in denen für die besondere Bildung der Ingenieure errichteten Anstalten des Auslandes, weil sie dort ohne Aufsicht die vielfachen zu ihrer Bildung nöthigen Übungen nicht vornehmen würden, so ist es für das Großherzogthum Baden ein dringendes Bedürfnis, für die Bildung derselben eine eigene unter der Aufsicht der Wasser- und Straßen-Bau-Direction stehende Anstalt um so mehr zu errichten, als früher eine solche Anstalt nicht bestund und die Bildung der Ingenieure und Geometer in erforderlichem Umfang der theoretischen und praktischen Wissenschaften nicht erzweckt werden konnte.“

Der Gedanke, die Bildungsschule für Ingenieure der Universität Heidelberg und ihrem mathematischen Lehrstuhle, auf den Tulla berufen werden sollte, anzugliedern, wurde bald fallen gelassen. Tulla vertrat die Auffassung, dass diese Anstalt nur in Karlsruhe errichtet werden könne, im Mittelpunkt des Landes,

„weil hier der Zusammenfluß aller vorkommenden Arbeiten ist und die Eleven so bald als möglich zu praktischen Arbeiten gebraucht werden sollen; auch wären selbst in Heidelberg die gewöhnlichen Vorlesungen der Mathematik nicht hinlänglich, Ingenieure zu bilden, sondern man müßte notwendig verschiedene Lehrarten für Ingenieure und diejenigen, welche es nicht werden wollen, wählen, so wie in Frankreich ein Unterschied gemacht wird, wo die Ingenieure in ganz besonderen Schulen gebildet werden.“

Wir sehen deutlich, wie das Vorbild der Ecole Polytechnique, die Tulla während seines Studienaufenthaltes in Paris kennengelernt hatte, bei dem Entwurf der Ingenieurschule mitgewirkt hat – nicht nur in der wissenschaftlich-mathematischen Grundlegung des Unterrichts, sondern auch in der bewussten Trennung der Technischen Hochschule von der Universität.

1807 wurde die Ingenieurschule in Karlsruhe eröffnet und unter die Leitung der Wasser- und Straßenbau-Direktion gestellt. Auf Tullas Empfehlung wurde der Mathematiker Ladomus für die Anstalt verpflichtet. Zweck der Schule war – so wurde ausdrücklich bestimmt – dass sie nicht unmittelbar Praktiker zu liefern habe, sondern *„daß der mathematische Sinn und Geist in den Eleven gebildet werde, so daß solche bei Einführung in die Praxis ein selbsttätiges Behandlungs- und Auffassungsvermögen besitzen.“*

Die eingeführte strenge Disziplinarordnung erinnert ebenfalls an die Ecole Polytechnique. Nach Tullas Ausspruch waren die Studierenden *„Zivilisten, welche sich dem Militär nähern.“* Sie trugen Uniform *„indem der Dienst der Ingenieure eine äußere Auszeichnung um so mehr erfordert, als dieselben öfters mit gezwungenen Arbeitern wichtige Anlagen machen müssen.“*

Vor der Aufnahme in die Ingenieurschule mussten sich die Bewerber einer Prüfung unterziehen, und zwar waren die Anforderungen an die Kandidaten für das Ingenieurstudium bedeutend größer als für diejenigen, *„welche sich blos dem Fache der Feldmeßkunst widmen und dieselbe practisch üben wollen.“*

Die Ausbildung erfolgte in drei Fachrichtungen, für

1. die Geometer,
2. die Ingénieurs géographes oder Trigonometer,
3. die Wasser- und Straßenbaumeister.

Die angehenden Geometer mussten folgende Fächer hören:

- Theoretische Wissenschaften:
Arithmetik, Geometrie, Elementaralgebra, Ebene Trigonometrie, Analytische Geometrie.
- Praktische Wissenschaften und Künste:
Schönschreibekunst, Situations-Zeichenkunst, Praktische Geometrie und Nivellieren,
Praktische Trigonometrie, Instrumentenkenntniß.

Außer diesen wären denselben nützlich:

- Oryctognosie, Geognosie.

Die Ingénieurs géographes mußten zusätzlich noch folgende Fächer belegen:

- Theoretische Wissenschaften:
Anfangsgründe der Differentialrechnung, Optik, Astronomie
und mathematische Geographie.
- Praktische Wissenschaften und Künste:
Projections- und Schattenlehre.
- Hilfswissenschaften:
Sprachkenntnisse, Geographie, Geschichte.

Die Wasser- und Straßenbaumeister mußten alle auf der Ingenieurschule gelehrt Gegenstände hören, also auch einschließlich die für die Ausbildung der Geometer und Ingénieurs géographes notwendigen. Es waren dies noch zusätzlich:

- Theoretische Wissenschaften:
Analysis des Endlichen und des Unendlichen, Statik, Hydrostatik, Aerostatik,
Dynamik, Mechanik fester Körper, Hydrodynamik.
- Praktische Wissenschaften und Künste:
Perspective, Bürgerliche Baukunst, Brücken-, Wasser- und Straßenbaukunst,
Maschinenlehre, Modellieren.
- Hilfswissenschaften:
Physik, Chemie, Technologie, "Das Nöthigste aus der Kameral-, Polizey- und
Rechtswissenschaft".

In einer Instruktion für die Lehrer des Ingenieur-Instituts heißt es weiter: „*Sobald die Eleven die erforderlichen arithmetischen, algebraischen und geometrischen Kenntnisse haben, sind dieselben im Sommer bei praktischen Vermessungen anzustellen; wo möglich zuerst bei Renovationen, sodann bei topographischen und endlich bei trigonometrischen Vermessungen; später sollen dieselben im Sommer beim Straßenbau und endlich beim Wasserbau angestellt werden; im Winter aber wieder in die Unterrichts-Anstalt zurückkehren.*“

Von besonderem Interesse ist für uns, in welchem Umfang die Gebiete der praktischen Geometrie und der höheren Geodäsie auf Tullas Ingenieurschule gelehrt wurden.

In derselben Instruktion heißt es dazu:

„Praktische Geometrie und Nivellieren

Die praktische Geometrie muß durch alle Theile geübt werden, dieses sind:

- *Aufnahmen mit Meßketten und Meßstangen,*
- *der Kreuzscheibe (Spiegel-Kreuzscheibe),*
- *dem Meßtische,*
- *der Winkelscheibe,*
- *der Bussole,*
- *dem Theodoliten,*
- *dem Spiegelsextanten,*
- *Nivellieren mit der Setzwaage,*
- *der Bergwaage,*
- *der Wasserwaage,*
- *Nivellieren durch Messung der Elevations-Winkel oder Zenith-Abstände,*
- *Höhe Messungen, trigonometrisch,*
- *Höhe Messungen, durch das Barometer,*
- *Theilung der Figuren.*

Trigonometrie, ebene und sphärische, nebst den Anfangsgründen der praktischen Messkunst. Die Trigonometrie muss sowohl synthetisch als analytisch vorgetragen werden, besonders aber müssen die Eleven geübt werden, scharf und sicher zu rechnen, damit sie hierin die für die Praxis nötigen Fertigkeit erlangen. Von der sphärischen Trigonometrie müssen Anwendungen gemacht werden auf Aufgaben, welche bei geographischen Vermessungen vorkommen und auf Aufgaben über die Lage der Ebenen.

Praktische Trigonometrie

- *Messung der Winkel nach der Répétitions Methode*
- *Centrierung der Winkel*
- *Correction der Seiten und Winkel nach der Methode des Wasser und Strassen*
Ober Baudirection Obristlieutenant Tulla
- *Berechnung der Abstände vom Meridian und den Perpendikuläre*
- *Construction der Polygone.*

Astronomische und mathematische Geographie

Die mathematische Geographie ist dem Ingénieur géographe nothwendig und jedem Ingenieur zu seiner Bildung im Allgemeinen nützlich; sie muß dabei so weit vorgetragen werden, als sie der Ingénieur géographe bedarf, und dabei aus der Astronomie dasjenige, was zu ihrem Verständnis erforderlich wird, vorausgeschickt werden.“

Neben der Tulla'schen Ingenieurschule bestand in Karlsruhe eine zweite wichtige Schule, Weinbrenners berühmte Bauschule, die einen großen Ruf weit über die badischen Grenzen hinaus erlangte.

Der Gedanke lag nahe, diese beiden Schulen zu einer polytechnischen Lehranstalt zu vereinigen. Schon 1808 wurde diese Möglichkeit von einer Kommission untersucht; sie konnte aber wegen Einwendungen des Finanzministeriums nicht verwirklicht werden. Erst 1820 wurde die Vereinigung der beiden Schulen und die Gründung einer polytechnischen Anstalt wieder in Erwägung gezogen. Anlass dazu war, dass in Freiburg der Physiker G. F. Wucherer mit Hilfe eines eigens dafür gegründeten Vereins ein polytechnisches Institut eröffnet hatte, das aber 1823 wegen Ausbleibens staatlicher Zuschüsse wieder geschlossen werden musste. Die Schule sollte allen denen eine Ausbildung geben, „*welche sich für den höheren bürgerlichen Verkehr bestimmen, nämlich den künftigen Kaufmann und Fabrikanten, dem Techniker und Artisten jeder Art (aber auch, in allem Wesentlichen, den juristischen und Cameralschreiber, den Apotheker und gewöhnlichen Chirurgen, dem Forstmann und Truppenführer usw).*“ Im Unterrichtsplan dieser Schule finden sich keine speziellen Lehrfächer, die zu einer Ausbildung von Geometern und Trigonometern notwendig waren. Die Umwandlung der Freiburger Universität in eine polytechnische Anstalt wurde lange Zeit in Erwägung gezogen. Dieselben Einwände aber, die Tulla einst gegen die Heidelberger Universität vorgebracht hatte, konnte er jetzt auch gegen Freiburg anführen. Der Plan wurde deshalb fallengelassen.

1821 wurde Wucherer zum Direktor des Physikalischen Kabinetts und zum Professor der Physik am Lyzeum in Karlsruhe ernannt. Seine Berufung geschah bereits in der Absicht, die Realklassen des Lyzeums zu einer höheren polytechnischen Schule umzugestalten. Wucherer entwarf einen Plan zur Errichtung einer polytechnischen Anstalt. Durch Erlass des Großherzogs Ludwig wurde diese dann am 7. Oktober 1825 ins Leben gerufen.

Die Ingenieurschule Tullas blieb – wie die Bauschule Weinbrenners – als besondere Fachschule weiterbestehen, gab aber die mathematische Vorbildung der Ingenieurzöglinge an die neue Schule ab; die Lehrer der Ingenieurschule, Hofrat Ladomus und Lehrer Kayser, erteilten zugleich Unterricht am polytechnischen Institut, zu dessen ersten Direktor Prof. Wucherer bestellt wurde.

Die neue Schule hatte folgende Abteilungen:

- Allgemeine Klasse
- Mathematische Klasse
- Handels- und Gewerbsklasse
- Fachschule für Baugewerbe.

Als Lehrer der praktischen Geometrie wirkte anfänglich Obergeometer Schäffer von der Wasser- und Straßenbau Direktion, der die Schüler des Polytechnischen Instituts, insbesondere der Mathematischen Klasse, und die der Ingenieurschule gemeinsam unterrichtete. In einem Bericht des Obergeometers Schäffer ersehen wir, dass der Unterricht in einer 1. Klasse und einer 2. Klasse durchgeführt wurde:

„Mit der 1. Classe wurde vorgenommen:

- *Absteckung und Verlängerung gerader Linien bey freyen Durchschnitten und unzugänglichem Terrain und auf sehr große Distanzen*
- *Messung gerader Linien mit Latten und der Kette*
- *Errichtung rechter Winkel mit und ohne Kreuzscheibe*
- *Untersuchung und Berichtigung der Kreuzscheibe*
- *Messung zugänglicher und unzugänglicher Weiten, mit und ohne Kreuzscheibe*
- *Aufnahme eines Stückes Feldes mit der Kreuzscheibe.*

Mit der 2. Classe wurde vorgenommen:

- *praktische Theilung und Absteckung der Theile*
- *Aufnahme mit dem Meßtisch*
 - *mit dem Diopter Lineal aus einem, aus 2 Punkten, und aus dem Umfang. Bey letzterem wurde auch das Rückwärts Einschneiden gezeigt,*
 - *mit dem Aufsatz auf ein Meßtischblatt bey freyem und bey durchschnittenem Terrain.“*

Im Jahre 1828 erscheint im Staats- und Reg. Blatt eine Verordnung über die Ausbildung der Geometer, worin es heißt:

„Jene Individuen, welche sich dem Fach der Feldmeßkunst widmen und in der Folge diese als praktische Geometer ausüben wollen, können ihre theoretische Bildung im polytechnischen Institut vollständig erhalten, und es wird denselben von Seiten der Ingenieur Schule Gelegenheit zur Erlernung der praktischen Geometrie gegeben.“

Da jedoch diese praktische Unterrichtung zur vollkommenen Ausbildung nicht genügt, so wird allen denjenigen, welche das Recht zur Ausübung der Feldmesskunst in der Eigenschaft als Geometer erlangen wollen, zur unerlässlichen Bedingung gemacht, dass sie nach Beendigung des theoretischen Unterrichts wenigstens ein halbes Jahr bei einem tüchtigen geprüften Geometer oder unter Leitung einer Wasser- und Straßenbauinspektion praktizieren müssen.

1832 wurde die polytechnische Schule, die bisher rein schulmäßig organisiert war, durch den Direktor des Ministeriums des Innern, den großen badischen Staatsmann und Schöpfer der badischen Verfassung von 1818, Nebenius, grundlegend umgestaltet. Seine Gedanken und Absichten veröffentlichte Nebenius in seinem Buch: *„Über technische Lehranstalten in ihrem Zusammenhang mit dem gesamten Unterrichtswesen und mit ihrer besonderen Rücksicht auf die polytechnische Schule zu Karlsruhe.“* Er schreibt über die Neuorganisation der polytechnischen Schule:

„Nach ihrer inneren Einteilung hat die Schule

- *eine aus zwei sog. mathematischen Classen bestehende Vorbereitungsschule, worin die Zöglinge jene Kenntnisse erwerben, welche die gemeinschaftliche Grundlage mehrerer Fachschulen bilden,*
- *eine Reihe von Fachschulen, nämlich: eine Ingenieurschule, eine Bauschule, eine Forstschule, eine höhere Gewerbeschule und eine Handelsschule.“*

Das polytechnische Institut wurde nach diesen Grundsätzen neu gestaltet und dadurch beträchtlich erweitert. Die Ingenieurschule des 1828 verstorbenen Tulla und die Bauschule Weinbrenners wurden mit der polytechnischen Anstalt endgültig vereinigt; weiterhin wurde eine Forstschule angegliedert. Die bisherigen allgemeinen Klassen der polytechnischen Schule wurden von dieser getrennt, um zusammen mit der Gewerbeschule zur Vorbereitung für die polytechnische Schule zu dienen und den selbständigen Zweck einer höheren Realschule zu erfüllen; sie erhielt den Namen "Vorschule" und blieb unter der oberen Leitung der Direktion der polytechnischen Schule, welche also nun aus einer Vorschule, zwei allgemeinen mathematischen Klassen und fünf besonderen Fachschulen bestand.

Für die 1. allgemeine mathematische Klasse war das zurückgelegte 15. Lebensjahr Vorbedingung, für die Fachschulen das 16. oder 17. Lebensjahr und die Absolvierung der einen oder beiden mathematischen Klassen.

In der neuen Verfassung von 1832 wurde der polytechnischen Schule durch die Übertragung weitgehender Verwaltungsbefugnisse, besonders auch durch die Einführung des von der allge-

meinen Lehrerkonferenz gewählten Direktors, Hochschulcharakter verliehen; der Unterricht selbst wurde aber weiterhin noch schulmäßig betrieben.

1836 wurde das neue von Oberbaurat Hübsch entworfene und aus Sandstein gemauerte Gebäude, der jetzige Hauptbau an der Kaiserstraße, bezogen, wodurch sämtliche bisher in verschiedenen Gebäuden der Stadt untergebrachten Klassen und Abteilungen des polytechnischen Instituts unter einem Dach vereint wurden.

Die Ausbildung der Geometer erfolgte von 1832 an in den beiden mathematischen Klassen, in denen auch praktische Geometrie gelehrt wurde. Aber nicht nur die Schüler dieser Klassen hörten "praktische Geometrie", sondern auch die der Ingenieurschule und der Forstschule, zeitweilig auch die der Bauschule und der höheren Gewerbeschule. Die Gesamtzahl der Schüler in diesem Fache war deshalb immer recht hoch, z. B. in den Jahren 1841/42 über 100. Später, in den Jahren 1864 bis 1872, als dem Polytechnischen Institut eine landwirtschaftliche Schule angegliedert wurde, besuchten auch deren Schüler Vorlesungen und Übungen in praktischer Geometrie.

Nach dem "Programm der polytechnischen Schule" vom Jahre 1832/33 beinhalteten die "Curse über praktische Geometrie" u. a. folgende Gegenstände (in der Reihenfolge, wie sie gelehrt wurden): Übungen in Planzeichnen, Aufgaben mit Messkette und Kreuzscheibe von den elementaren Messungen bis zur Aufnahme von ganzen Gewannen, "Feldertheilung und Rectification krummliniger Grenzen, vom Nivellieren, vom scheinbaren Horizont und von der Refraction, von der Setzwaage und der Kanalwaage, vom Meßtisch und der Alhidade, vom Distanzmesser, Meßtischaufnahmen verschiedener Art, Figurierung des Terrains, von der Boussole, deren Einrichtung zu topographischen Arbeiten, ihrer Prüfung und Berichtigung, Bestimmung einer Mittagslinie zum Orientieren isolierter Aufnahmen, von den Nivellierinstrumenten mit Fernröhren, Theorie der Libellen, von den dazu gehörigen Nivellierlatten, das Theodolit, von den Reflexionsinstrumenten, Beschreibung des Verfahrens bei einer größeren Triangulierung, Reduction der Dreieckspunkte auf einen Meridian und seinen Perpendikel, wirkliche Bestimmung einiger Signalpunkte."

1828 hatte bereits Prof. Guido Schreiber den Unterricht in der praktischen und darstellenden Geometrie übernommen. Schreiber, der bis zu seiner Anstellung am polytechnischen Institut Lehrer an der badischen Artillerieschule war, gebührt das Verdienst, Monges "Géométrie descriptive" in Deutschland Verbreitung verschafft zu haben. Es geschah dies, außer durch mündlichen Unterricht, durch seine nach Monge und Hachette bearbeitete "darstellende Geometrie" (1828), das erste umfassende Buch über diesen Gegenstand in deutscher Sprache. Er veröffentlichte, außer weiteren Werken über die darstellende Geometrie, auch "Vorlesungen

über praktische Geometrie" (1842) und "Geodäsie, Anleitung zum geometrischen Theilen der Grundstücke" (1857).

Die Unterrichtung einer so großen Zahl von Schülern der praktischen Geometrie war von einem Lehrer nur mit großer Mühe zu bewältigen. In Eingaben des polytechnischen Instituts an das Ministerium des Innern um Anstellung eines Assistenten heißt es, dass *„nicht allein die Masse der Zöglinge, sondern auch die Verteilung derselben in vier Säle die Überwachung und Leitung der Arbeiten einem einzigen Lehrer gänzlich unmöglich machten.“* Und *„der aufzustellende Assistent hat die Obliegenheiten, sowohl im Sommer bei den praktischen Arbeiten auf dem Feld, als im Winter, wenn die Resultate der Vermessungen zusammengestellt und die geometrischen Pläne ausgeführt und die Eleven im Planzeichnen unterrichtet werden, dem betreffenden Lehrer zu assistieren.“*

Lange Zeit musste sich Prof. Schreiber mit nur zeitweilig angestellten Hilfsassistenten begnügen, bis 1841 eine feste Assistentenstelle geschaffen und bis zum Jahre 1844 mit dem Hilfslehrer der praktischen Geometrie Karl Hofmann, dem späteren Leiter und Organisator der badischen Katastervermessung, besetzt wurde.

Die Vermessungsübungen waren damals recht umfangreich. Wir lesen in einem Bericht des Stabsguiden Pfeiffer, der von 1844 bis 1851 die Assistentenstelle innehatte, dass u. a. folgende Arbeiten mit dem oberen Kurs der praktischen Geometrie im Sommer 1850 durchgeführt wurden: *„Eine Triangulierung der Umgegend von Karlsruhe, darauf aufbauend eine topographische Aufnahme im Maßstab 1:1500 in 6 Blättern; auf Excursion die Umgegend von Mutschelbach trianguliert, auf diese Triangulierung gestützt, in 1:2500, drei Meßtischblätter aufgenommen; die Höhenvermessung zur Festlegung der horizontalen Kurven besorgt; ein Nivellement auf einer Strecke von 3/4 Stunden Weg mit vier Querprofilen aufgenommen.“*

Gegen Ende der 40er Jahre wurden oft Klagen über Nachlässigkeiten beim Unterricht des Prof. Schreiber und über seinen manchmal etwas feuchtfröhlichen Lebenswandel laut, die im Jahre 1851 zu seiner Pensionierung führten.

Als Nachfolger Schreibers wurde Christian Wiener, Privatdozent an der Universität Gießen, nach Karlsruhe berufen. Er vertrat das Fach "praktische Geometrie" bis 1865 und "darstellende Geometrie" bis 1896. Prof. Wiener befasste sich neben mathematischen auch mit physikalischen und philosophischen Fragen. Sein Hauptwerk bildet das "Lehrbuch der Darstellenden Geometrie" (2 Bände, 1884 und 1887); weiterhin veröffentlichte er 1867 eine große philosophische Abhandlung über "Die Grundzüge der Weltordnung", die aber nur wenig Beachtung fand.

Von 1865 bis 1868 übernahm Hilfslehrer Max Doll – seit 1859 Assistent – den Lehrauftrag über "praktische Geometrie". Doll, der fast vierzig Jahre, bis 1898, dem Lehrkörper der polytechnischen Schule angehörte und 1873 zum Obergeometer ernannt wurde, betreute später am Lehrstuhl von Prof. Jordan und seinem Nachfolger Prof. Haid die Übungen in praktischer Geometrie, weiterhin das "Plan und Terrainzeichnen", die Übungen im trigonometrischen Rechnen und die Vorlesung über Katastervermessung und Feldbereinigung. Er veröffentlichte u. a. "Vorlegeblätter zum Plan und Terrainzeichnen" und ein "Lehrbuch der praktischen Geometrie" (1880). M. Doll war von 1873 bis 1875 Mitschriftleiter der Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV). Für Jordans Handbuch der Vermessungskunde zeichnete er viele Abbildungen. Die badische Eisenbahndirektion beauftragte ihn mit der Leitung des Präzisionsnivelements ihrer sämtlichen Bahnen in einer Länge von 1100 km, dessen Ergebnis 1877 veröffentlicht wurde. Nebenbei sei bemerkt: Die beiden Töchter Dolls waren mit berühmten Männern verheiratet: Die eine mit dem Entdecker der elektromagnetischen Wellen, Heinrich Hertz, die andere mit C. Pulfrich, dem "Vater der Stereophotogrammetrie".

Seit der Verbindung der Ingenieurschule Tullas mit der polytechnischen Schule 1832 war ein besonderes Fachstudium für den Beruf des Ingenieurgeographen nicht mehr vorgesehen. Es muss angenommen werden, dass schon in Tullas Ingenieurschule diese spezielle Ausbildung nur von wenigen Schülern gewählt wurde; die meisten hörten wohl die übrigen Fächer des Ingenieurwesens mit. Ein viel umfangreicheres Wirkungsfeld stand ihnen damit später offen.

Seit 1832 wird die "höhere Geodäsie" als ein Teil des Ingenieurwesens an der Ingenieurschule gelehrt. Als Professor der höheren Geodäsie und der Wasser und Straßenbaukunde wirkte seit dieser Zeit der aus Freiburg i. Br. stammende Karl Bader. Bader, der in seiner Jugend zuerst Medizin studierte, war als Burschenschafter politisch sehr aktiv tätig und musste das 1819 nach den Karlsbader Beschlüssen mit einer zweijährigen Gefängnishaft in der Hausvogtei zu Berlin büßen. Aus dem Gefängnis entlassen, fühlte er keine Neigung mehr zum Arztberuf, sondern begann ein neues Studium, das der Ingenieurwissenschaft, in Göttingen und Paris. Von anschließend längeren Reisen zurückgekehrt, wurde Bader 1832 auf Ersuchen von Hofrat Ladomus an der Ingenieurschule angestellt.

Dem Programm 1833/34 ist zu entnehmen, in welchem Umfang er in jener Zeit die höhere Geodäsie vorgetragen hat. Der "Curs" war einjährig mit wöchentlich 2 Stunden und beinhaltete: *„Einleitung in die Astronomie und mathematische Geographie; von der Messung der Grundlinien, Reduction derselben auf eine Normaltemperatur, auf die Horizontallinie und auf die Meeresfläche; die geodätische Linie; geodätische Beobachtungen; der Heliotrop, die Signale; Bearbeitung der Beobachtungen, Untersuchung ihrer Zuverlässigkeit, ihrer Fehlergrenze;*

Bestimmung der Coordinaten der geodätischen Punkte auf dem Erd-Sphäroid; Zuverlässigkeit dieser Resultate, Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung nach der Methode von Gauss; geographische Ortsbestimmung; Bestimmung der Breiten und Längenunterschiede zweier Orte durch astronomische Hilfsmittel; Bestimmung der Azimuthe durch astronomische Hilfsmittel; Bestimmung der Größe der Erde; das geodätische und barometrische Nivellement; vom Gebrauche trigonometrischer Ortsbestimmungen zu Netzpunkten für Charten; Analysis und Construction der wichtigsten Charten Projectionen, besonders aber a) Darstellung der bei der Vermessung von Frankreich (depôt de guerre) gebräuchlichen Projectionsart, b) Darstellung der Gaußschen Projection. Unmittelbare Herleitung der Coordinaten der zu projicirenden Punkte aus den Beobachtungen; allgemeine Betrachtungen über die Anordnung und Ausführung einer großen geodätischen Operation.“

Prof. Bader, der ab 1840 fünf Jahre Direktor der Polytechnischen Schule war, bekleidete zahlreiche Nebenämter. Unter anderem organisierte er nach dem furchtbaren Karlsruher Theaterbrand 1847 ein großes Feuerlöschkorps und wirkte als Mitglied der badischen Eisenbahndirektion an der Einführung der Eisenbahn in Baden tatkräftig mit. Den vielen Nebenbeschäftigungen ist es wohl zuzuschreiben, dass von Seiten des Polytechnikums und seiner Schüler bald Klagen über die Vernachlässigung seines Unterrichts laut wurden, die schließlich 1850 zu seiner Pensionierung führten. Bader entfaltete später eine rege publizistische Tätigkeit; seit 1853 vor allem als Verteidiger der Katholischen Partei im Kirchen- und Schulkampf gegen die liberale badische Regierung unter den Ministern Lamey und Jolly.

Die höhere Geodäsie, die wie der in den Jahren 1849/50 dieses Fach vortragende Assistent Winckler schreibt, „in ihrer heutigen Gestalt eine ebenso umfangreiche, als wegen des Umstandes, daß ihre einzelnen Theile in den Schriften über andere, verwandte Wissenschaften zerstreut sind, auch schwer zugängliche Wissenschaft ist,“ wurde anfänglich nur rein theoretisch gelehrt. Das Fehlen geeigneter Instrumente für entsprechende Übungen wurde aber bald als großer Mangel empfunden. 1850 wurde ein Antrag an das Ministerium des Innern gestellt, verschiedene Instrumente, die für die badische Landesvermessung nicht mehr gebraucht wurden, für den geodätischen Unterricht zu erwerben. 1851 konnten dann vom badischen Topographischen Bureau folgende Instrumente beschafft werden: Ein 8-zölliger Repetitionstheodolit von Reichenbach und Ertel (Baujahr 1823). Er ist eines der beiden Instrumente, mit denen die badische Landestriangulierung in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts durchgeführt wurde. Ein 8-zölliger Höhenkreis von Ertel, der bei der umfangreichen trigonometrischen Höhenmessung in Baden von 1833 bis 1844 Verwendung fand. Weiterhin zwei Heliotrope nach der Gaußschen Konstruktion (Baujahr 1824), die ebenfalls bei der badischen Landestriangulierung eingesetzt waren. Für Übungen im astronomischen Teil der Geodäsie

wurde 1855 ein großes Universalinstrument von Pistor und Martins, Berlin, erworben. Alle Instrumente sind in der Sammlung des Geodätischen Instituts noch vorhanden.

Von 1851 bis 1857 wurde "höhere Geodäsie" von den Professoren der Mathematik, Dienger und Buzengeiger, von 1857 bis zur Berufung Jordans 1868 von Prof. Wiener gelesen.

Ebenfalls abwechselungsweise von den Professoren Dienger und Buzengeiger wurde von 1857 bis 1868 eine spezielle Vorlesung über "die Methode der kleinsten Quadrate" gehalten, die bis dahin im Rahmen der "höheren Geodäsie" vorgetragen wurde. Prof. Dienger veröffentlichte 1857 ein Lehrbuch über "Ausgleichung der Beobachtungsfehler nach der Methode der kleinsten Quadrate mit zahlreichen Anwendungen, namentlich auf geodätische Messungen".

1857 wird die Vorbildung der Geometerkandidaten erstmals klar geregelt. Eine landesherrliche Verordnung bestimmte, dass derjenige, welcher Geometer werden will, mindestens die Kenntnisse mitbringen muss, welche durch den vollständigen Besuch einer höheren Bürgerschule erworben werden können. Die höheren Bürgerschulen, die meist aus den alten Lateinschulen hervorgegangen waren, bekamen 1834 ihr Organisationsstatut. Diese Schulen lassen sich am besten mit den späteren Mittelschulen vergleichen. Da diese Vorbildung mit der Zeit nicht mehr ausreichte, wurde 1868 durch eine Verordnung eine neue Regelung geschaffen: *„Wer Geometer werden will, muß sich mindestens die Kenntnisse erwerben, welche auf einer Gelehrtschule (Lyzeum, Gymnasium) bis zur oberen Abteilung der 5. Klasse (Oberquinta), oder auf einem Realgymnasium bis zum 7. Jahreskurse erworben werden können.“*

Das Jahr 1865 brachte der Polytechnischen Schule eine neue Organisationsform, nämlich die volle Hochschulverfassung mit Berufungsverfahren und Selbstverwaltung. Es war dies die Frucht einer Entwicklung, die, begonnen von Nebenius, vor allen von den Professoren Redtenbacher und Grashof gefördert und beschleunigt wurde: Der polytechnischen Schule den Charakter einer Hochschule zu verleihen.

Die Gründerjahre (1868 - 1917)

Heinz Draheim¹

Am Anfang des Beitrags „Die Vorgeschichte (1825 - 1867)“ von G. Oberholzer in dieser Festschrift ist kurz angedeutet worden, dass es das Zusammenführen verschiedener Zweige der Geodäsie in einer Lehr- und Forschungsstätte war, das als besonderes Ereignis anzusehen ist. In der Tat hat vor 100 Jahren in Karlsruhe und etwas später auch an anderen Hochschulen eine Entwicklung eingesetzt, die zur Bildung eines Berufsstandes des Vermessungsingenieurs geführt hat, den es heute in dieser Form nur in Deutschland und in einigen anderen europäischen Ländern gibt, während in vielen anderen Staaten, z. B. auch in den USA, Großbritannien und in Frankreich, die vielseitigen und zum Teil sehr verschiedenartigen wissenschaftlichen und praktischen Belange, die sich hinter den Bezeichnungen "Geodäsie" und "Vermessungswesen" verbergen, auch heute noch von Berufsträgern mit völlig verschiedenartiger Ausbildung und Blickrichtung wahrgenommen werden. Wir können allerdings heute mit Befriedigung feststellen, dass in der zur Zeit sehr lebhaften internationalen Diskussion über die Berufsausbildung im Bereich der Geodäsie das deutsche System eine wichtige Rolle spielt.

Zum besseren allgemeinen Verständnis soll noch kurz erläutert werden, was eigentlich an den deutschen Geodätischen Instituten zusammengeführt wurde. Unser Fachbereich, der heute breite Strom der geodätischen Wissenschaft und Praxis, wurde und wird aus drei Quellen gespeist, wobei die Vereinigung dieser Quellflüsse im Bereich der Hochschulen – wie bereits gesagt – etwa vor 100 Jahren einsetzte, während sie in der Praxis noch bis vor ganz wenigen Jahren nebeneinander herfließen, zum Teil durch hohe Dämme gegeneinander abgeschirmt, sodass Pfitzer einmal von den drei geodätischen Wirklichkeiten sprach, die nebeneinander bestünden. Es handelt sich dabei zuerst um die Geodäsie als „*Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche*“, wie es Helmert formuliert hat, die sich für diese Aufgabe aber keineswegs nur auf die Erdoberfläche beschränken konnte, sondern das Schwerfeld der

¹ Überarbeiteter Beitrag aus der Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts aus dem Jahr 1993

Erde zu studieren hatte und heute dabei ist, sich zur "Selenodäsie" auf der einen und zur "Marinegeodäsie" auf der anderen Seite auszuweiten. Der zweite Bereich ist aus den militärischen Bedürfnissen erwachsen. Er hat zur Entwicklung von zusammenhängenden topographischen Kartenwerken geführt und damit Anlass zur Anlage umfassender Festpunktfelder gegeben, als Rückgrat und Rahmen für alle kartographischen Darstellungen, so dass auch die Kartographie weitgehend zum geodätischen Arbeitsbereich gehört.

Der dritte Aufgabenbereich ist ein Kind der französischen Revolution. In ihrem Streben nach Gerechtigkeit und Gleichheit für alle Bürger wurde als Grundlage für eine gerechte Besteuerung die Errichtung von Steuerkatastern veranlasst, die sich bald über Eigentumskataster zum heutigen Mehrzweckkataster entwickelten und den Kern für alle anderen vermessungstechnischen Betätigungen abgaben, die man unter dem Sammelbegriff "Vermessungswesen" zusammenfasst, wozu also z. B. auch die Flurbereinigung und wesentliche Teile der Bodenordnung gehören.

Die Klammer, die diese durchaus sehr verschiedenartigen Aufgaben zusammenhält, ist die Notwendigkeit der exakten Lokalisierung von Punkten und Formen unserer Erdoberfläche, was nur durch genaue Messungen auf, unter und über dieser Erdoberfläche im systematischen Aufbau möglich ist. „*Es ist die Magie der Koordinaten, die die Vermessungs- und Kartenwelt zusammenhält,*“ hat Pfitzer einmal formuliert, und in diese Vermessungswelt sind auch die wissenschaftlichen Aufgaben der Geodäsie einbezogen, die ohne den praktischen Nutzen, den man aus den Messungen in den übrigen Bereichen zu ziehen vermag, kaum die Möglichkeit hätten, über theoretische Erörterungen hinauszukommen. Diese Klammer ist auch heute noch wirksam, obwohl die Aufgaben nach allen Seiten hin Ausweitungen erfahren, sodass heute zum Beispiel Probleme der Bahnen künstlicher Satelliten oder der Veränderung der Schwerkraft auf der einen Seite und die Fragen der Bewertung eines Grundstückes bei der Enteignung aus Anlass des Straßenbaus auf der anderen Seite zum Interessengebiet des Geodätischen Instituts gehören und in Lehre und Forschung gefördert werden müssen.

Diese Andeutungen wurden gemacht, um die Situation zu kennzeichnen, vor der unsere Hochschule stand, als sie sich vor 100 Jahren entschloss, einem Fachgebiet, das damals zwar noch nicht die heute vorhandene Breite aufwies, aber durchaus wenigstens die Keime für alle späteren Aufgaben in sich trug, eine selbständige Pflegestätte zu geben.

Unmittelbarer Anlass war der Wunsch des Professors der Darstellenden Geometrie Christian Wiener, der bisher den Unterricht in der "praktischen Geometrie und Höheren Geodäsie" mit vertreten hatte, „*seine Kräfte auf sein für die Zwecke unserer Anstalt so wichtiges Fach konzentrieren zu können.*“ Seit 1865/66 war deshalb der geodätische Unterricht nur provi-

sonisch geregelt: er wurde von Assistenten wahrgenommen, was dem damaligen Hilfslehrer für praktische Geometrie Doll, über dessen Wirken bereits im vorstehenden Beitrag „Die Vorgeschichte (1825 - 1867)“ berichtet wurde, veranlasste, im Jahre 1867 um seine Anstellung als Professor nachzusuchen. Der "kleine Rath" entschloss sich jedoch, eine neue Professur zu beantragen und mit einem Manne zu besetzen, der „*auch die höchste Spitze des Faches zu vertreten im Stande ist.*“ Dolls Wunsch nach einer Professur ist nie in Erfüllung gegangen. Als ihm im Jahre 1899, kurz nach seiner Pensionierung, Prof. Haid (Abb. 3) noch einmal einen Lehrauftrag über "Katastervermessungssysteme und Feldbereinigung" anbot, machte Doll dies von der Ernennung zum Professor abhängig, welche das Abteilungskollegium schon anlässlich seiner Pensionierung beantragt hatte. Das Ministerium hat jedoch diesen Antrag abgelehnt. So kam auch dieser Lehrauftrag nicht mehr zustande.

Dem Antrag auf Errichtung eines neuen Lehrstuhls stimmte jedoch das Ministerium mit dem "hohen Erlaß vom 18. August 1867, Nr. 10597" zu. Das ist daher der eigentliche Geburtstag des heutigen "Geodätischen Instituts".



Abb. 2: Prof. Wilhelm Jordan
(*13.10.1838, +17.04.1899)

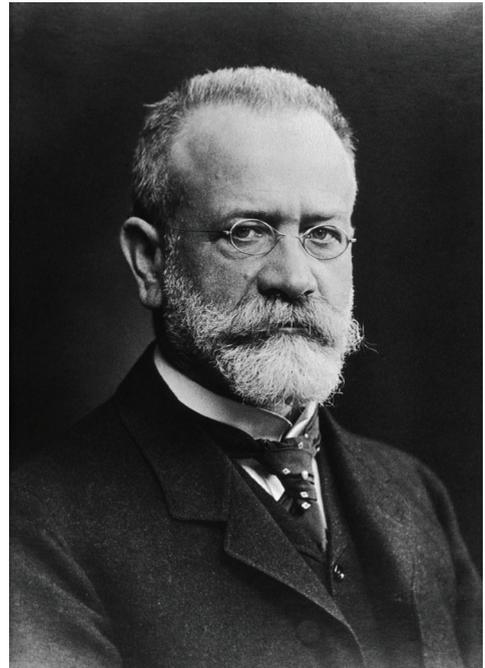


Abb. 3: Prof. Matthäus Franz Haid
(*28.02.1853, +05.11.1919)

Die Berufungskommission unter Leitung von Prof. C. Wiener machte sich sogleich an die Arbeit. Aus der vorstehend geschilderten schwierigen fachlichen Situation wird wohl deutlich, dass sie keine leichte Aufgabe hatte. Die Schwierigkeit wird vorzüglich durch die Antwort des Königlich Preußischen Generalleutnants J. J. Baeyer, des Begründers der Internationalen Erdmessung, auf die Anfrage aus Karlsruhe deutlich, der bedauerte, keinen Vorschlag machen zu können mit der Begründung, *„die vorhandenen Individuen sind entweder Theoretiker aber keine Praktiker; oder sie sind Praktiker ohne hinreichende theoretische Kenntnisse und letztere meist auch von zweifelhaften Lehrgaben.“*

Trotz dieser Schwierigkeiten kam jedoch eine ansehnliche Berufsliste zusammen, benannt von Persönlichkeiten, die noch heute ihren bleibenden Platz in der Geschichte der Wissenschaften haben, wie Baeyer, Bruhns, Nagel, Littrow und von Struve. Unter den Benannten befand sich übrigens auch der Mathematiker Weingarten, Schüler Dirichlets, Dozent an der Bauakademie zu Berlin, der aber nicht weiter in Betracht gezogen wurde, *„weil er insbesondere keine Vertrautheit mit den Instrumenten besaß und außerdem schwerlich zu haben sei, da in Berlin mehr Aussichten eröffnet sind,“* und Prof. Koristka, Rector des Polytechnicums in Prag und korrespondierendes Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Wien. Von den genannten Herren blieben nach gründlichen Überlegungen, die in einem ausführlichen Bericht des Vorsitzenden der Berufungskommission festgehalten sind, zwei Namen übrig: Jordan, der von seinem Lehrer Prof. Baur benannt worden war, und Helmert, der von Baeyer in einem zweiten Brief nachgemeldet wurde, als *„unter allen jungen Männern . . . am meisten qualifiziert.“* Welche Beruhigung für den heutigen Betrachter. Es konnte einfach nichts schiefgehen; wenn Karlsruhe nicht den "Altmeister des Vermessungswesens" bekommen hätte, dann wäre es der "Altmeister der Geodäsie" gewesen.

Berufen wurde Jordan (Abb. 2) nach den auch damals schon üblichen Schwierigkeiten bei den Verhandlungen im Ministerium des Innern, das feststellte, *„die Forderungen des Herrn Assistenten Jordan am Königlichen Polytechnikum in Stuttgart erscheinen uns im Verhältnis zu den Bezügen der Lehrer in der hiesigen Anstalt und zu seiner damaligen Stellung einigermaßen hochgegriffen“* und die Polytechnische Schule zu Karlsruhe aufforderte, *notfalls mit Herrn Helmert zu verhandeln und mit tunlichster Beschleunigung darüber zu berichten.* Man einigte sich jedoch bald, nachdem Grashof, der damalige Direktor, Jordan außerdienstlich persönlich beraten hatte, auf ein Jahresgehalt von 1600 Gulden. Die "höchste EntschlieÙung" Nr. 23 wurde am 09.01.1868 ausgefertigt und mit Schreiben vom 13.01.1868 mitgeteilt.

Die Reihenfolge bei der Berufung wurde so gewählt, *„weil Helmert erst 23 Jahre alt war und noch in Leipzig studierte“* und aus dem Grunde, *„daß Jordan bisher etwas mehr technisch-*

geodätisch, Helmert vorwiegend in geographischen Arbeiten größeren Stils sich zu üben Gelegenheit gehabt hat.“ Baur hatte in seiner Beurteilung gerühmt, dass Jordan *„sich schon in seiner Schulzeit bei einer guten Begabung für reine Mathematik durch einen ungewöhnlichen Sinn für die Anwendung derselben auf praktische Arbeiten und einen hervorragenden Trieb zu letzterer auszeichnet,*“ wies allerdings auch auf eine *„etwas wilde Periode“* während seiner Studienzeit hin, lobte, dass ihm keine Arbeit und kein Zeitaufwand zuviel sei, *„wenn es gilt Kopf und Arm zum Besten des Geschäfts zu nützen,*“ und hob hervor, dass er bei seinen Studiengenossen eine hervorragende Stellung eingenommen hatte. Über seine "Wirksamkeit als Lehrer" erwähnt Baur *„als ein etwas minder günstiges Moment einen gewissen Mangel an äußerer Form und Sicherheit des Auftretens,*“ Jordans Gebaren im Lehrsaal zeige, *„wie man bei uns sagt, Schußeliges und Fahriges, das der Stetigkeit seiner Einwirkung auf die Schüler einigen Eintrag thun mag.*“ Baur bescheinigt ihm allerdings anschließend gute Lehrerfolge und drückt sein Bedauern darüber aus, diesen *„jungen von mir sehr geschätzten Mann“* verlieren zu sollen, bringt aber zum Ausdruck, dass er ihm *„seine Laufbahn, in der er seinen Fähigkeiten entsprechend wirken könnte“* herzlich gönnt.

Die Berufungskommission hatte die Erwartung ausgedrückt, dass sich Jordan bei den Arbeiten der Mitteleuropäischen Gradmessung, bei denen Baeyer großen Wert auf eine badische Mitwirkung legte, die ihm fehlenden Kenntnisse zur Höheren Geodäsie zuerwerben würde. Reisekostenbelege aus den ersten Karlsruher Jahren weisen auch auf eine anfängliche Mitarbeit Jordans hin. Wie wir aus den Mitteilungen von Jordans Sohn Hermann wissen, kam es aber bald zu Differenzen mit Baeyer. Dafür konnte Jordan aber im Winter 1873/74 an der Rohlf'schen Expedition in die Lybische Wüste teilnehmen, wo er astronomische Arbeiten und Routenaufnahmen machte und Barometrie betrieb, die bis zum heutigen Tage im Geodätischen Institut besonders gepflegt wird. Seine Arbeiten in Lybien wurden durch die Ehrendoktorwürde der Münchner Universität ausgezeichnet, auch sonst erfuhr er manche Ehrung und hatte Gelegenheit, sich außerhalb von Lehre und Forschung zu betätigen. So wurde er Mitglied des Obereichungsamtes und der Normaleichungskommission, nahm auf Einladung von Graf Moltke 1880 an der Basismessung in Göttingen teil und führte noch in seinem letzten Karlsruher Jahr – in der tragischsten Zeit seines Lebens – im Auftrage der Preussischen Landesaufnahme Nivellements von 200 km in Baden durch. Auch am 1. Kongress der "Fédération Internationale des Géomètres" (FIG) im Jahre 1878 in Paris nahm er teil.

Jordans große Bedeutung aber lag auf literarischem Gebiet. Pfitzer hat in der Gedenkschrift zum hundertsten Geburtstag Jordan *„einen großen Erzieher“* genannt. Ihm hat der Deutsche Geometerverein *„das größte Auditorium gestellt, vor dem je ein deutscher Geodäsieprofessor gelehrt hat.“*

Bereits im 2. Heft (Februar 1872) der "Zeitschrift für Vermessungswesen", die im Auftrage des 1871 begründeten "Deutschen Geometervereins", des heutigen "Deutschen Vereins für Vermessungswesen" (DVW) erschien, finden wir als ersten Fachaufsatz dieser Zeitschrift einen Beitrag von Jordan "Über die Genauigkeit der Längenmessung mit Kette und Latte". Im Doppelheft September/Oktober 1872 lesen wir dann bereits, dass Herr Jordan, Professor am Großherzoglichen Polytechnikum in Karlsruhe, zum Chefredakteur dieser Zeitschrift gewählt wurde. Mit ihm kam auch der Obergeometer M. Doll in die Schriftleitung. Jordan und Doll hatten sich vorher schon durch die Unterstützung eines seit Januar 1871 erscheinenden Monatsblattes des Geometervereins in Baden, das schon nach 2 Jahrgängen in der Zeitschrift für Vermessungswesen aufging, die Anerkennung ihrer Berufskollegen erworben.

Der oben genannte erste Aufsatz von Jordan in dieser Zeitschrift, der mit dem Satz beginnt *„Kaum dürfte auf dem ganzen Gebiete des Vermessungswesens ein Gegenstand zu finden sein, welcher bei scheinbarer Einfachheit länger einer gründlichen Erörterung entbehrte, als die Bestimmung der mittleren Fehler, welche unter gewöhnlichen Umständen bei der Messung gerader Linien mittels der gebräuchlichen einfachen Werkzeuge, Meßkette oder Meßlatte zu fürchten sind, und es ist daher die Bedeutung dieser fundamentalen Frage ein dringendes Bedürfnis geworden,“* gab übrigens gleich Anlass zu einer recht hitzigen Diskussion, die wohl durch einen Seitenhieb Jordans auf die Ansichten der Praxis herausgefordert wurde, durch die Feststellung, *„daß es verschiedene Arten von praktischem Gefühl gibt und daß durchaus nicht immer das feinere bei dem sich am meisten darauf berufenen Praktiker und Empiriker zu suchen ist, daß im Gegenteil dasselbe durch theoretische Betrachtungen ausgebildet wird.“*

Angegriffen fühlte sich vor allem ein Mitglied der Schriftleitung dieser Zeitschrift, Franke, der Assistent an der königlich polytechnischen Schule in München war und noch im gleichen Jahrgang konterte, *„daß die fragliche Arbeit weit entfernt Klarheit in die Sachlage zu bringen uns eher geeignet erscheint in manchen Beziehungen das Gegenteil hervorzurufen, und daß der Verfasser einige unserer früheren Bemerkungen über diesen Gegenstand nicht in ihrem richtigen Sinne aufgefaßt haben dürfte.“* Der Zusammenarbeit scheint dieser wissenschaftliche Streit aber keinen Abbruch getan zu haben, denn wir finden den Namen Franke als königlich bayrischen Obergeometer noch viele Jahre als Mitarbeiter auf dem Titelblatt der Zeitschrift für Vermessungswesen, deren Hauptschriftleitung Jordan bis zu seinem Tode innehatte. Sicherlich würde er es wohl auch dem Schreiber dieser Zeilen nicht verübeln, dass er 100 Jahre später in diesem von ihm begründeten Institut die 1889 begründete Konkurrenzzeitschrift "Allgemeine Vermessungs Nachrichten" herausgibt. Offenbar ist Karlsruhe literarisch anregend, denn auch das zweite bedeutende Handbuch der Vermessungskunde wurde 50 Jahre später von Näbauer in Karlsruhe geschrieben.

Schon wenige Jahre nach Übernahme des Karlsruher Lehrstuhls aber legte Jordan den Grund zu dem heute noch einzigartigen geodätischen Standardwerk, dem "Handbuch der Vermessungskunde" das zur Zeit in 10. Auflage mit 6 Bänden und 6 Ergänzungsbänden erscheint. Als eine "Sammlung von Resultaten der niederen und höheren Vermessungskunde" gab er im Verlag der J. B. Metzler'schen Buchhandlung in Stuttgart 1873 ein "Taschenbuch der praktischen Geometrie" heraus – seinem *verehrten Lehrer und Freund* Baur gewidmet –, das in seiner Anlage mit den 3 Teilen Methode der kleinsten Quadrate, Niedere Geodäsie und Höhere Geodäsie bereits alle Grundelemente des heutigen Handbuches enthält. Schon die zweite, 1877 erschienene Auflage trägt, nunmehr zweibändig, den heute weltberühmten Titel "Handbuch der Vermessungskunde".

Der Bildungswert dieses Handbuches, das auch jetzt noch vielfach einfach "der Jordan" genannt wird, und sein Einfluss auf die Formung des Vermessungsingenieurs kann kaum überschätzt werden. Jordans "Taschenbuch der praktischen Geometrie" war eigentlich keine Veröffentlichung dieses Typs, wie es Jordan selbst schon empfand. Wenn man bedenkt, wie verhältnismäßig gering die Anforderungen an die in der Praxis tätigen Geometer waren, worauf im vorigen Abschnitt eingegangen wurde, erstaunt nicht nur die Stoffauswahl für ein Taschenbuch, das zwar auch den Studierenden aber "namentlich auch dem Praktiker einen Dienst" erweisen sollte, sondern vor allem die außerordentlich starke Betonung der Methode der kleinsten Quadrate, die von Jordan bewusst an den Anfang des Taschenbuches und des späteren Handbuches gestellt wurde. Im Vorwort zur 2. Auflage bekennt er dazu:

„In Bezug auf die Bedeutung der Methode der kleinsten Quadrate für das niedere Vermessungswesen erlaube ich mir, hier meine schon früher in der Zeitschrift für Vermessungswesen ausgesprochene Ansicht zu begründen. Es soll die Voraussetzung gemacht werden, daß in der gewöhnlichen Vermessungspraxis die Methode der kleinsten Quadrate im allgemeinen nicht anwendbar sei, und dennoch läßt sich behaupten, daß ein gewisses Studium der Ausgleichsrechnung auch hier unerlässlich ist, und zwar deswegen, weil es allein richtige Begriffe über das Wesen der Beobachtungsfehler, über die Genauigkeit verschiedener Messungsoperationen und über Fehlerausgleichung, möge sie nun nach der Methode der kleinsten Quadrate oder nach dem praktischen Gefühl erfolgen, zu schaffen im Stande ist, und weil dadurch der Sinn für Beurteilung der Genauigkeit einer Messung in hohem Grade geweckt wird.

Es ist in anderen technischen Wissenschaften durchaus nicht anders: der Ingenieur, der Maschinenbauer braucht in der gewöhnlichen Praxis unmittelbar nur einen sehr geringen Teil der theoretischen Festigkeitslehre und anderer Wissenschaften, welche aus unseren polytechnischen Schulen gelehrt werden, und doch ist es anerkannt, daß nur das Studium dieser Wissenschaften unsere Techniker davor bewahrt, ihr Fach als Handwerk zu betreiben.

Ebensowenig als man von einem Constructeur verlangt, daß er z. B. die Dimensionen der Balken eines Wohnhauses durch Rechnung bestimmt, wird vom Geometer verlangt werden dürfen, daß er seine gewöhnlichen Polygonzüge nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgleiche; aber ebenso wie z. B. ein Constructeur, welcher über Trägheitsmoment, Moment der äußeren Kräfte etc. im Klaren ist, dem reinen Empiriker unter allen Umständen überlegen ist, wird dieses auch beim Geodäten der Fall sein, welcher über den mittleren Fehler, Fehlerfortpflanzung etc., sich Klarheit verschafft hat.“

Jordan hat sich noch mit einem zweiten Werk in die ewige Literaturliste des deutschen Vermessungswesens eingeschrieben: Mit der historisch kritischen Darstellung "Das Deutsche Vermessungswesen", die er zusammen mit Steppes im Auftrag des Deutschen Geometervereins verantwortlich herausgegeben hat und als Verfasser des überwiegenden Teiles des ersten Bandes "Höhere Geodäsie und Topographie des Deutschen Reichs". Dieses Werk beginnt mit den seither vielzitierten und auch heute noch nicht ganz unzutreffenden Sätzen:

„Es ist nicht bloß eine gebräuchliche Einleitungssphrase, sondern es entspricht den wirklichen Verhältnissen, wenn gesagt wird, daß kaum ein anderer Zweig der exakten Wissenschaften mit den wichtigsten Culturinteressen so innig verwachsen ist und dennoch in seiner Gesamtlage und in seiner Einzelausführung so wenig allgemein erkannt ist und richtig gewürdigt wird, wie das Vermessungswesen.

Dies gilt namentlich bezüglich der geodätischen Fundamentaloperationen, Triangulationen und Präcisionsnivellements, obgleich einzelne Formen, in welchen deren Schlußresultate in der Oeffentlichkeit treten, z. B. "Generalstabskarten" und "Gradmessung" sich allgemeiner Aufmerksamkeit erfreuen.

Der Versuch, über die deutsche Geodäsie in wissenschaftlicher Beziehung eine Uebersicht zu gewinnen, entspricht in unserem Vaterlande einem dringenden Bedürfnis aus verschiedenen Gründen, von denen die Consequenzen unserer ungleichartigen politischen Entwicklung in erster Linie zu zählen sind.“

Alle diese Werke waren Früchte seiner glücklichen Jahre in Karlsruhe, die durch eine Entscheidung Jordans, die er selbst als „übereilt“, als „falschen Schritt“ und „ohne genügende Überlegung“ getroffen bezeichnet hat, überraschend abgeschlossen wurden.

In einem ministeriellen Schreiben vom 7. Oktober 1881 lesen wir:

„Seine Königliche Hoheit der Großherzog haben mit Allerhöchster Staatsministerial Erschließung d. d. Karlsruhe den 5. Oktober 1881 Nr. 437 dem Professor der praktischen Geometrie und höheren Geodäsie an der polyt. Schule Dr. Wilhelm Jordan die unterthänigst nachgesuchte Entlassung aus dem bad. Staatsdienste auf 31. Dezember d. J. gnädigst zu bewilligen geruht.“

„So ging von da an ein Riß durch sein Leben,“ schreibt Jordans Sohn Hermann, dem wir auch weitere Aussagen und Vermutungen über die Hintergründe von Jordans Wechsel nach Hannover verdanken. Die Vermutungen zielen dabei auf die Beschuldigung ab, dass Jordan mehr oder weniger das Opfer einer kollegialen Intrige und unkorrekten Verhaltens der Karlsruher Direktion geworden ist. So müßig es ist, heute darüber zu rätseln, ob es für die geodätische Wissenschaft und sein persönliches Leben besser gewesen wäre, wenn Jordan Karlsruhe nicht verlassen hätte, wo er so glücklich war, wie es ihm seine Natur erlaubte, und ob ihm dann auch sein früher tragischer Tod erspart geblieben wäre, so ist es doch wohl heute die Pflicht dieser Darstellung, festzustellen, dass nichts in den in Karlsruhe verfügbaren Unterlagen auf eine Berechtigung dieser Vermutung hindeutet, sondern eher ein ungewöhnliches kollegiales Entgegenkommen deutlich wird.

Jordan hatte 1880 einen Ruf nach Braunschweig abgelehnt, nachdem ihm in Karlsruhe sein Wunsch auf eine Gehaltserhöhung, die allerdings unter dem Braunschweiger Angebot blieb, sofort erfüllt wurde. Am 01.08.1881 erhielt er dann einen Ruf als Professor der Vermessungskunde nach Hannover. Im September reichte er sein Entlassungsgesuch ein, dem das Angebot aus Hannover beigelegt war. Dieses Entlassungsgesuch aber ist so bestimmt formuliert, dass man Prof. Wiener, der zum Ausdruck brachte, dass es kaum Zweck hätte, sich um Jordans Bleiben zu bemühen, nur schwer widersprechen kann. So wurden Jordans Terminwünsche erfüllt, der angeboten hatte, seine Vorlesungen zusammenzufassen, damit er am 31.12.1881 – also während des Semesters – Karlsruhe verlassen könnte. Jordan erkrankte dann aber so schwer, dass er sich durch Doll vertreten lassen musste.

Die eigentliche Tragödie aber kam erst später: Nachdem die erste am 03.11.1881 aufgestellte Berufungsliste für Jordans Nachfolge nicht zum Erfolg geführt hatte, bewarb sich Jordan am 14.01.1882 wieder um die Karlsruher Professur, und der Senat befürwortete diesen Antrag trotz gewisser – wohl verständlicher – Bedenken. Bevor jedoch das Schreiben an das Ministerium abgegangen war, zog Jordan seine Bewerbung telegraphisch zurück und bat um eine persönliche Besprechung, in der er Bedenkzeit wünschte und erhielt. Es folgte ein neuer Verzicht, und schließlich wollte er den Verzicht wieder zurücknehmen, worauf aber der "kleine Rath" nicht mehr einging, weil man die Besetzung nicht von der „*augenblicklichen Richtung von Jordans Willen*“ abhängig machen könnte.

In Anbetracht dieser Vorgänge fällt es schwer, den Ausführungen Pfitzers zu Jordans 100. Geburtstag zu folgen, der in dem Wechsel Jordans nach Hannover fachpolitische Hintergründe vermutete. Es war wohl eine bedauernswerte, rein menschliche Tragödie.

Für Jordans Nachfolge waren zunächst Helmert, nunmehr Professor in Aachen, und Vogler, Professor an der landwirtschaftlichen Akademie in Poppelsdorf, vorgesehen. Man hoffte Helmert zu bekommen, weil er in Aachen nur wenige Studenten hatte, aber Helmert lehnte aus nicht bekannten Gründen ab und Vogler bekam offenbar ein lukrativeres Angebot aus Berlin.

Übrigens gingen auch einige Bewerbungen um die Nachfolge Jordans in Karlsruhe ein, darunter die von Prof. Emanuell Czuber, Privatdozent an der deutschen technischen Hochschule zu Prag. Den Ruf erhielt dann am 14.02.1882 Dr. Matthäus Haid, 2. Assistent für Geodäsie und Privatdozent an der TH München. An 2. Stelle stand der 1. Assistent für Geodäsie in München. Von Haid sagt Jordans Sohn, „*ihm ist es geglückt, alles das zu erreichen, was Jordan erstrebt hätte.*“ Und wenn Pfitzer von Jordan sagte „*Geheimrat ist Jordan nie gewesen,*“ so ist festzustellen, dass Haid Geheimrat wurde und dies gewiss kein Nachteil war.

Der am 28.02.1853 zu Speyer als Sohn eines Kaufmanns geborene Franz Matthäus Haid studierte 1870/71 an der Bau und Gewerbeakademie in Berlin, 1871/72 am Polytechnikum zu Aachen und abschließend bis 1874 am Polytechnikum in München. Einer praktischen Tätigkeit im bayrischen Staatsdienst (mit Staatsexamen) folgte 1877 eine Assistententätigkeit bei von Bauernfeind in München, bei dem er sich, nach seiner Promotion in Jena, 1880 habilitierte. Seine Habilitationsschrift behandelte die Untersuchung der Beobachtungsfehler und die Genauigkeit des bayrischen Präzisionsnivelements. Von Bauernfeind hatte ihn auch nach Karlsruhe empfohlen, wo er bis zu seiner Emeritierung am 21.05.1917 wirkte, ausgezeichnet durch die Ernennungen zum Hofrat, zum Geheimen Hofrat und zum Geheimen Rat II. Klasse, außerordentliches Mitglied der Oberdirektion des Wasser- und Straßenwesens, zugleich Vorstand des topographischen Bureaus, Mitglied der Normaleichungskommission und dekoriert durch badische, preußische, russische und griechische Orden. 1890 lehnte er einen Ruf nach München zur Nachfolge von Bauernfeinds ab.

Haid verdankt das Geodätische Institut eine gewisse geophysikalische Note, um deren Erhaltung sich seine heutigen Nachfolger durch eine erweiterte und vertiefte Zusammenarbeit mit den anderen geowissenschaftlichen Instituten unserer Universität bemühen. Er schuf die heute noch bestehende Erdbebenwarte, auf die in dieser Festschrift im Beitrag „Die Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts (1904 - 1989)“ von H. Mälzer besonders eingegangen wird, und seine besondere Liebe galt den Schweremessungen. Mit dem von ihm selbst konstruierten, von Carl Bamberg, Berlin Friedenau – den heutigen Askania Werken – 1895 gebauten Vierpendelapparat verband er die Haupt Pendelstationen Karlsruhe, Straßburg, Leiden, Paris, Padua, Wien, München, unterstützt von Dr. J. Bürgin.

Dass Haid in den Jahren nach der Jahrhundertwende jährlich 2.000,- M. „zur Fortsetzung der wissenschaftlichen Arbeiten zum Zwecke der internationalen Vereinigung für Gradmessung“ erhielt, kann von seinen Nachfolgern, denen internationale Zusammenarbeit nicht weniger am Herzen liegt, den heute für solche löblichen Taten zuständigen Stellen nur zur Nachahmung empfohlen werden. Auch für die instrumentelle Ausstattung des Geodätischen Instituts konnte Haid viel tun, wie alte Rechnungen ausweisen.

Zu geodätisch nicht alltäglichen Arbeiten gehörten auch seine 1888/89 im internationalen Rahmen durchgeführten Tiefenmessungen im Bodensee, die bis heute nicht wiederholt sind. Auf der anderen Seite war er auch als Berater der griechischen Regierung für die Einrichtung eines Grundstückskatasters tätig. Von 1911 bis 1914 wirkte sein Assistent August Kraft als Organisator und Lehrer für die Grundstücksvermessungen am Königlich Griechischen Militärgeographischen Institut. Als Kraft bei Beginn des 1. Weltkrieges nach Deutschland zurückkehrte, um Soldat zu werden, begleiteten ihn die besten Wünsche der griechischen Kollegen und die Hoffnung auf seine Rückkehr nach Griechenland, aus der aber nichts wurde.

In die Zeit von Prof. Haid fällt auch der Bau des Aulabaus der Technischen Hochschule (siehe Abb. 4), in dem sich das Geodätische Institut heute noch befindet. Auch damals scheint das Bauen nicht ganz reibungslos gewesen zu sein, denn die großherzogliche Baudirektion sah sich veranlasst, am 17. Juni 1898 in einem längeren, ziemlich geharnischten Schriftsatz fest-

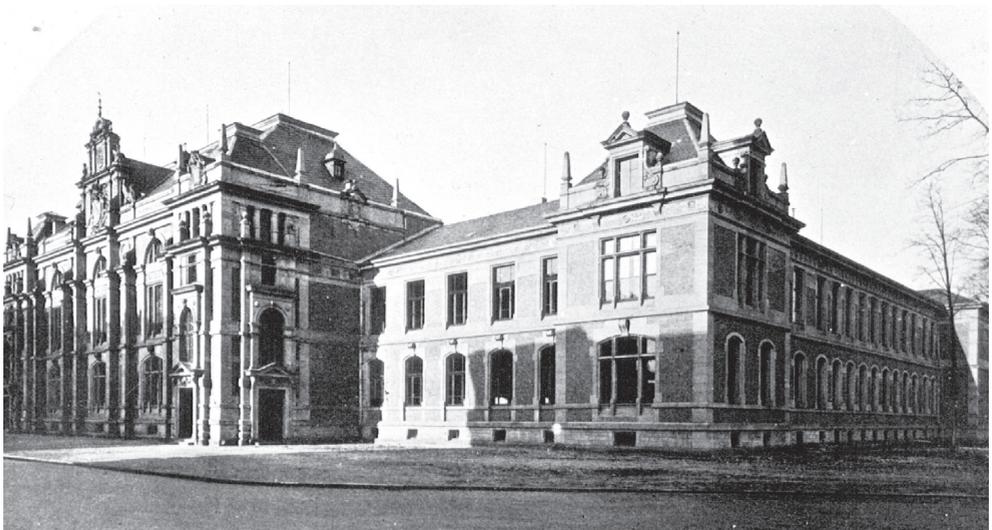


Abb. 4: Historische Ansicht des Aulabaus. Im linken Gebäudeteil befand sich die "Aula".

zustellen, dass die Wünsche von Prof. Haid nicht nur zum großen Teil berücksichtigt wurden, „*sondern ganz und gar so, wie sie verlangt worden sind,*“ wobei auf 9 Einzelbeanstandungen ziemlich drastische Ratschläge erteilt wurden, wie zum Beispiel der, „*daß der Herr Professor die große Tafel aus dem Saal Nr. 33 gefälligst selbst entnehmen und an dem Orte festnageln lassen sollte, der ihm tauglich erschiene,*“ oder „*dass es dem Herrn Professor überlassen bleibe, genau anzugeben, was an den Steinplatten für die feste Aufstellung der Stative zu machen ist da wohl niemand sonst dies in richtiger Weise tun kann. Wir zum Beispiel wissen es nicht.*“ Immerhin weisen die Unterlagen aus, dass Haid schließlich immer das erreicht hat, was er wollte, so etwa die Klimatisierung des Uhren und Komparatorraumes im Keller oder die Errichtung eines Beobachtungshäuschens.

In den ersten Jahren von Haid's Wirken tritt auch zum ersten Mal die heutige Bezeichnung "Geodätisches Institut" auf, und zwar in einer Rechnung des Jahres 1886. Vorher waren alle Rechnungen und sonstigen Mitteilungen immer an die "praktische Geometrie" gerichtet, wobei jedoch schon früher von der "geodätischen Sammlung" die Rede war, so z. B. bei der Überlassung eines Basismessapparates durch das Handels Ministerium, um den Jordan 1881 gebeten hatte, und auch in wesentlich älteren Unterlagen. Vom 15. November 1886 findet sich eine Mitteilung der Direction in den Akten, die "Anschaffung von Lehrmitteln für das Geodätische Institut" betreffend. Es hat den Anschein, dass diese Bezeichnungsänderung mit einer Neuordnung des Rechnungswesens der Hochschule, die im Mai 1886 vorgenommen wurde, zusammenhängt.

Haid hat zweimal an der Spitze des Lehrkörpers unserer Hochschule gestanden. 1894/95 war der ordentliche Professor der Geodäsie "Direktor der Großherzoglich Badischen Technischen Hochschule zu Karlsruhe", 1901/02, als Geheimer Hofrat und Professor für Geodäsie, "Rektor der Großherzoglich Technischen Hochschule zu Karlsruhe". Seine Festreden anlässlich der Übernahme seines Amtes beschäftigten sich mit der Gestalt und Bewegung der Erde und mit den modernen Zielen der Erdmessung.

Haid's zweites Rektorat fiel mit dem 50-jährigen Regierungsjubiläum des Großherzogs Friedrich zusammen. So kam es ihm zu, am 1. Mai 1902 in einer Jubelfeier dem „*Erhabenen Landesfürsten in der Feststimmung, die das ganze Badner Land durchzieht und ihre Wogen weit über die heimatlichen Grenzen, über den blauenden See und den blinkenden Strom hinüberträgt . . . im Gefühle unbegrenzter Dankbarkeit und Verehrung den Beginn des vielbesungenen Lenzenmondes weihen zu dürfen,*“ und auch für zwei Beweise allerhöchster Huld und Gnade zu danken, nämlich für die Verleihung des Namens "Fridericiana" und die Stiftung einer "Amtskette". Ein Geodät war damit der

erste Träger dieses äußeren Zeichens der Rektorwürde. Die „*als Denkmal solcher Dankbarkeit, höchster Liebe und Verehrung*“ in der Aula angebrachten Worte der Verleihungsurkunde, die künftigen Geschlechtern Kunde geben sollte „*von der Fürsorge und Gnade unseres erhabenen Landesfürsten*“, sind mit dem Aulagebäude im 2. Weltkrieg in Schutt und Asche versunken.

Nach 35-jähriger erfolgreicher Tätigkeit wurde Haid aus Gesundheitsgründen im Mai 1917 emeritiert. Er starb am 05.11.1919 in seiner Geburtsstadt Speyer. Auf der Berufungsliste für seine Nachfolge stand an 1. Stelle Martin Näbauer, an 2. Stelle Reinhard Hugerhoff, o. Professor für Vermessungskunde an der Königlichen Forstakademie zu Tharandt, einer der Pioniere der Photogrammetrie. Den Ruf zum 01.10.1917 erhielt der 38-jährige Näbauer, in Blaufels bei Wasserburg in Bayern geboren, seit 1910 Professor für Geodäsie an der TH Braunschweig.

Jordan und Haid – diese beiden bedeutenden Männer haben das erste halbe Jahrhundert des Geodätischen Instituts geformt. Jordans Name überstrahlt dabei nach außen hin den seines Nachfolgers, es sind aber besonders die Spuren von Haid's Wirken, die noch heute in unserem Institut deutlich spürbar sind, nicht zuletzt durch die menschliche Überlieferung, die bis in unsere Tage weitergetragen wurde durch Merkel, der sein Schüler und Mitarbeiter war und dann später einer seiner Nachfolger wurde.

Zwischen den Kriegen (1918 - 1945)

Karl Vieser¹

Die Aufgaben und Einrichtungen des Geodätischen Instituts wurden in der Zeit zwischen den beiden Weltkriegen von zwei Entwicklungen wesentlich beeinflusst und erweitert. Die eine wird durch die im Jahre 1921 an der Technischen Hochschule Karlsruhe durchgeführte Studienreform für Vermessungsingenieure mit dem Abschluss in einer Diplomhauptprüfung gekennzeichnet, die andere durch neue wichtige Erkenntnisse und Fortschritte im Geräte- und Instrumentenbau für vermessungstechnische Zwecke, wodurch bisher übliche Aufnahme- und Auswertungsverfahren verbessert und durch neue rationellere ersetzt werden konnten.

Mit dem Kriegsende im Spätjahr 1919 begann die Rückkehr ehemaliger Studierender der Fridericiana vom Kriegsdienst und späterhin aus der Kriegsgefangenschaft zu ihrer früheren Ausbildungsstätte und die Neuimmatrikulation von Angehörigen jener Jahrgänge, denen es ihres Kriegsdienstes wegen nicht möglich gewesen war, nach Ablegung der Reifeprüfung ihr Studium ordnungsgemäß aufzunehmen. Bei diesem verstärkten Andrang Studierender wurden im Wintersemester 1918/19 und Frühjahr 1919 Zwischensemester eingeführt, um älteren Kriegsteilnehmern und solchen, deren Studium durch den Krieg unterbrochen worden war, eine rasche Ausbildung und einen baldigen Abschluss des Studiums zu ermöglichen. Auch die Zahl von Studierenden der Geodäsie stand deshalb in den ersten Nachkriegsjahren erheblich über dem gewohnten Durchschnitt der Vorkriegsjahre; sie betrug im Wintersemester 1920/21 über 35.

Die Unterrichtstätigkeit in dieser Zeit wurde von dem damaligen Ordinarius für Geodäsie und Direktor des Geodätischen Instituts Prof. Martin Näbauer (Abb. 5), dem Inhaber der planmäßigen Lehrstelle am Institut Obergeometer Heinrich Merkel und dem Assistenten Geometer Karl Herrmann ausgeübt. Dazu trat als Lehrbeauftragter für das Fachgebiet Katastervermessung und Feldbereinigung der Leiter der Abteilung Katastervermessung und Feldbereinigung an

¹ Überarbeiteter Beitrag aus der Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts aus dem Jahr 1993

der Badischen Wasser- und Straßenbaudirektion in Karlsruhe und spätere Honorarprofessor Ludwig Stutz.

Vorlesungen und Übungen wurden zunächst im Rahmen des vor dem 1. Weltkrieg üblichen Umfangs aufgenommen. Auch die Vermessungsübungen des Sommersemesters im freien Gelände fanden wie vor dem Kriege an den alten Örtlichkeiten statt, in der Hauptsache an den Hängen des Turmbergs bei Durlach und die Gebäudeaufnahme bei der an der Alb gelegenen Appenmühle im Ortsteil Daxlanden. Als nach dem Kriege der in Hochschulnähe gelegene und vorher nicht zugängliche Fasanengarten öffentlich freigegeben wurde, verlegte man die Übungen teilweise an den Ahaweg längs der Schlossgartenmauer und in der Hauptsache dorthin, wo sie noch heute stattfinden.

Art und Umfang der Vorlesungen und Übungen erfuhren indessen bald einige Änderungen. Die erste ergab sich im Sommersemester 1920 mit der Verlegung der Abteilung Forstwesen von der TH Karlsruhe an die Universität Freiburg. Damit kamen die bisherigen geodätischen Vorlesungen und Übungen für Studierende der Forstwissenschaft in Wegfall. Dagegen wurden in der Folgezeit für Angehörige anderer Fakultäten Pflicht- und Wahlfächer aus dem Gebiet der Geodäsie eingeführt.

Schließlich erhielten folgende Studierende ihre Ausbildung:

- Vermessungsingenieure in allen geodätischen Fächern.
- Bauingenieure: Vermessungskunde, Kartenkunde und in Grundzügen der Photogrammetrie; außerdem waren sie zur Teilnahme an der Hauptvermessungsübung I (topographische Geländeaufnahme) und ihrer Ausarbeitung verpflichtet. Kandidaten des Vertiefenfaches "Vermessung" hatten noch folgende Pflichtfächer zu hören: Ausgleichsrechnung, Höhere Geodäsie und Sphärische Astronomie.
- Architekten in Vermessungsübungen.
- Maschineningenieure in den Wahlfächern:
 - Grundzüge der Vermessungskunde,
 - Grundzüge der Photogrammetrie,
 - Astronomisch-geographische Ortsbestimmungen.
- Mathematiker (Lehramtskandidaten) im Wahlfach:
 - Astronomisch-geographische Ortsbestimmungen.

Die wichtigste Änderung in der Unterrichtstätigkeit hatte jedoch das Jahr 1921 mit der am 4. April 1921 ergangenen Verordnung, die Ausbildung, Prüfung und Beaufsichtigung der öffentlich bestellten Feldmesskundigen betr., veröffentlicht im Badischen Gesetz- und Verordnungsblatt 1921, S. 97, gebracht. Sie war das Ergebnis jahrelanger Bestrebungen der Badischen Geometer, das Studium der Geodäsie dem in anderen deutschen Bundesstaaten und den Ausbildungsforderungen vergleichbarer technisch-wissenschaftlicher Berufe anzupassen. Diese Bemühungen wurden vor allem von Prof. Näbauer unterstützt, der schon in einem Bericht vom 23. April 1918 an Rektor und Senat die unbedingt notwendige Ausbildung von Vermessungsingenieuren in einem mindestens 7-semesterigen Hochschulstudium, das die Reifeprüfung einer höheren Lehranstalt voraussetzt, begründet und in der Folgezeit nachdrücklich vertreten hatte.

Nach § 2 der Verordnung vom 4. April 1921 musste, wer in Baden als Geometer öffentlich bestellt werden oder eine staatliche Anstellung im höheren Vermessungsdienst erlangen wollte, das Reifezeugnis einer höheren Lehranstalt besitzen und an der Technischen Hochschule zu Karlsruhe den Grad eines Diplomingenieurs im Vermessungsfach erworben haben. Damit waren die gesetzlichen Voraussetzungen gegeben, das 6-semesterige Studium für Vermessungsingenieure mit dem Erwerb des Grades eines Diplomingenieurs an der Technischen Hochschule Karlsruhe einzuführen.

Der dafür notwendige Studienplan wurde durch Erlass des Ministeriums für Kultus und Unterricht vom 9. August 1921 genehmigt. Er sah neben Vorlesungen und Übungen für Bodenkunde, Botanik, Geologie, Mineralogie, Bürgerliches Recht, Staats- und Verwaltungsrecht sowie Volkswirtschaftslehre, einer Erweiterung der mathematischen und physikalischen Grundlagen, einer Einführung in die wichtigsten Zweige der Ingenieurwissenschaften, auch die notwendige Ergänzung und Vertiefung der geodätischen Vorlesungen und Übungen vor.

In welchem Umfange hierbei die Unterrichtstätigkeit auf dem engeren Fachgebiet der Geodäsie beeinflusst wurde, zeigt eine Gegenüberstellung der Unterrichtsfächer nach dem alten (Tabelle 1) und neuen Studienplan (Tabelle 2). Der Studienplan von 1921 sah den Studienbeginn im Sommersemester vor, eine mehrmonatige Vorpraxis hatte der Studierende bei Beginn seines Studiums nicht nachzuweisen. Diese wurde erst im Jahre 1925 eingeführt, als die Dauer des Studiums auf 7 Semester erhöht und der Beginn auf das Wintersemester verlegt wurde.

Nach der Einführung der Studienreform ging zunächst die Anzahl der Geodäsiestudierenden stark zurück; im Jahre 1925 betrug sie nur noch zwei (siehe Tabelle 3). Von den 1921 eingeschriebenen Studierenden, die ihr Studium noch nach der alten Studienordnung begonnen hatten, holten diejenigen, die nur die Primareife besaßen, alle fast ausnahmslos in der Folgezeit

Tab. 1: Geodätische Vorlesungen und Übungen nach dem alten Studienplan.

Lehrveranstaltung	V	Ü
Praktische Geometrie	3	
Repetitorium der praktischen Geometrie	2	
Methode der kleinsten Quadrate	2	
Höhere Geodäsie	3	
Katastervermessung und Feldbereinigung I	3	2
Katastervermessung und Feldbereinigung II	2	2
Geodätisches Praktikum (3-semesterig)		11
Plan- und Terrainzeichnen (3-semesterig)		10
Ausarbeitung der großen geodätischen Excursion		2
Große geodätische Excursion (topogr. Geländeaufnahmen)		2W
Summe der Semesterwochenstunden	15	27

die Reifeprüfung nach, um den Erfordernissen der neuen Prüfungs- und Ausbildungsordnung zu genügen. Auch erwarben in diesen Jahren etwa 15 Geometer, die bereits im Berufsleben standen, nachträglich den Grad eines Diplomingenieurs im Vermessungswesen nach den Bedingungen einer Übergangsregelung. Danach mussten sie das Reifezeugnis einer höheren Schule besitzen und sich in sämtlichen Fächern einer Prüfung unterziehen, in denen sie in ihrer I. Staatsprüfung nicht geprüft worden waren. Auch mussten sie die in diesen Fächern notwendigen Übungsarbeiten fertigen. Den Nachweis einer besonderen Diplomarbeit brauchten sie allerdings nicht zu erbringen.

Die geodätischen Vorlesungen und Übungen nach dem alten und neuen Studienplan sind in den Tabellen 1 und 2 aufgelistet.

In den Jahren nach 1925 begann die Zahl der Geodäsiestudierenden wieder anzusteigen. Sie erreicht in späteren Jahren nie mehr den Tiefstand dieses Jahres. Ihr wechselhafter Stand in der Zeit zwischen den beiden Weltkriegen ist aus Tabelle 3 ersichtlich.

Das Jahr 1926 brachte eine Änderung in der Leitung des Geodätischen Instituts. In diesem Jahr folgte Prof. Näbauer einem ehrenvollen Ruf an die Technische Hochschule München. Sein Weggang zu diesem Zeitpunkt traf das Geodätische Institut empfindlich. Prof. Näbauers Verdienste um die Einführung der vollakademischen Ausbildung für Vermessungsingenieure in Baden sind bereits erwähnt worden. Ebenso groß sind sie aber auch um die Aufstellung des

Tab. 2: Geodätische Vorlesungen und Übungen nach dem neuen Studienplan.

Lehrveranstaltung	V	Ü
Vermessungskunde I	5	
Vermessungskunde II	3	4
Ausgleichsrechnung	2	
Höhere Geodäsie I	3	
Höhere Geodäsie II	2	
Katastervermessung und Feldbereinigung I	3	3
Katastervermessung und Feldbereinigung II	3	3
Geodätisches Praktikum (4-semesterig)		12
Photogrammetrie	1	2
Astronomisch-geogr. Orts-Zeitbestimmungen	2	2
Plan- und Geländezeichen (4-semesterig)		12
Zeichnen geodätischer Instrumente		2
Ausarbeiten geodätischer Aufnahmen I		4
Ausarbeiten geodätischer Aufnahmen II		4
Hauptvermessungsübungen I (topogr. Geländeaufnahmen)		2W
Hauptvermessungsübungen II (Katasteraufnahme)		2W
Summe der Semesterwochenstunden	24	48

neuen Studienplanes und seine reibungslose Durchführung, die eine starke Erweiterung der Unterrichtstätigkeit aller Lehrkräfte mit sich brachte.

Des angesehenen Gelehrten, des in freudiger Hingabe ganz seinem Lehramte verbundenen Lehrers und des verständnisvollen Förderers seiner Studierenden soll an dieser Stelle in Achtung und Dankbarkeit gedacht werden.

Zu seinem Nachfolger als Ordinarius für Praktische Geometrie und Höhere Geodäsie und Leiter des Geodätischen Instituts wurde der Privatdozent und a. o. Professor Dr.-Ing. Adolf Schlötzer an der Technischen Hochschule München berufen. Prof. Schlötzer (Abb. 6) sah bei der Übernahme seines Lehramtes in Karlsruhe seine erste Aufgabe darin, Vorlesungen und Übungen im Geiste seines Vorgängers fortzuführen und die Einrichtungen des Instituts den neuen und steigenden Anforderungen anzupassen. Sobald die notwendige Ausstattung

beschafft war, führte er im Rahmen der topographischen Geländeaufnahmen in Furtwangen photogrammetrische Aufnahmen von hierfür geeigneten Teilflächen des Aufnahmegebietes ein. Die terrestrischen Aufnahmen wurden seit 1929 am Stereokomparator ausgewertet. Diese als Übungsarbeit für Geodäten eingeführte Auswertung brachte damals aufschlussreiche Vergleichsmöglichkeiten zwischen der aus der photogrammetrischen Auswertung gewonnenen photographischen Darstellung eines Geländeabschnittes und der aus der üblichen Messtisch- und Tachymeteraufnahme.

Schon in den zwanziger Jahren mehr aber noch in den Dreißigern zeigen sich auf dem Gebiet der Geodäsie Ansätze einer Entwicklung, die in den Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg fast stürmisch verlief. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass die klassischen Aufgaben der praktischen Geometrie und der höheren Geodäsie vielfach erweitert und den Bedürfnissen und Forderungen einer anspruchsvolleren und veränderten Gegenwart angepasst werden mussten. Das selbstgenügsame und fast eigentlich verborgene Dasein der Geodäsie im Schatten größerer wissenschaftlicher Disziplinen ging zu Ende. Dies kam auch in den Bestrebungen zur Vereinheitlichung des deutschen Vermessungswesens zum Ausdruck, ein Beispiel hierfür



Abb. 5: Prof. Martin Näbauer
(★14.10.1879, †26.10.1950)



Abb. 6: Prof. Adolf Schlötzer
(★10.06.1884, †11.03.1963)

Tab. 3: Studierendenzahlen.

Wintersemester	Studierende
1918/19	rd. 25
1920/21	rd. 35
1923/24	rd. 15
1925/26	rd. 2
1930/31	rd. 15
1935/36	rd. 20
1939/40	rd. 10

ist der 1921 gegründete Beirat für das Vermessungswesen, eingesetzt zur Förderung und allmählichen Vereinheitlichung des deutschen Vermessungswesens. Die Bestrebungen verfolgten das Ziel, in die Vielfalt der einzelnen Landesaufnahmen und räumlich begrenzter, maßstabsunterschiedlicher Kartenwerke Ordnung zu bringen, überräumliche Zusammenhänge zu schaffen und Kontakte der Zusammenarbeit mit Nachbarstaaten Deutschlands zur Lösung gemeinsamer geodätischer Aufgaben aufzunehmen. Außerdem traten die verschiedensten Zweige von Wirtschaft und Wissenschaft mit neuen Ansprüchen an das Vermessungswesen heran, um sich geeignete Unterlagen für ihre mannigfaltigen Zwecke rasch zu beschaffen.

Damit fallen in dieser Zeit neue Aufgaben an; sie fordern neue rationelle Aufnahme- und Auswertungsmethoden und die Herstellung von Kartenwerken verschiedener Zweckbestimmung. Damit war oftmals die Aufspaltung bisher einheitlicher Arbeitsgebiete in einzelne, aus den jeweiligen Bedürfnissen entstandene Sondergebiete verbunden; auch die Geodäsie wurde von der Spezialisierung erfasst und der Verzahnung mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen gegenübergestellt. Die Studienpläne aus jener Zeit zeigen, dass das Geodätische Institut diese Vorgänge aufmerksam verfolgt und stets berücksichtigt hat. Die Ausweitung des Studiums der Geodäsie an der Technischen Hochschule Karlsruhe zu Anfang der Dreißigerjahre auf eine Studiendauer von 8 Semestern suchte ebenfalls dieser Entwicklung Rechnung zu tragen.

Als nach 1933 alle Anstrengungen darauf gerichtet waren, einen straff organisierten Zentralstaat zu schaffen und auch dabei, wo in den früheren Ländern Verschiedenheiten in der Ausbildung von Angehörigen der einzelnen Berufsstände bestanden, diese zu beseitigen und einheitliche Regelungen zu treffen, wurden die Verhältnisse an den deutschen Hochschulen von den dadurch eingeleiteten Maßnahmen ebenfalls betroffen. So wurde das Studium des

Vermessungswesens an den deutschen Hochschulen mit einer Verordnung des Reichsministers für Wissenschaft, Erziehung und Volksbildung im Einvernehmen mit dem Reichsminister des Innern vom 5. Mai 1938 neu geregelt und gleichzeitig eine reichseinheitliche Diplomprüfungsordnung für die Studierenden des Vermessungswesens erlassen. Weiterhin wurde bei dieser reichseinheitlichen Neuordnung festgelegt, dass an allen Technischen Hochschulen die Diplom-Vorprüfung abgelegt werden kann, die vollständige Ausbildung mit Diplom-Hauptprüfung indessen nur an den Technischen Hochschulen Berlin-Charlottenburg, Hannover, Karlsruhe, München und der Universität Bonn möglich ist.

Die Studienordnung von 1938 sah eine Studienzeit von mindestens 7 Halbjahren und eine praktische Tätigkeit von 4 Monaten vor, die in der Regel während der Semesterferien vor der Vorprüfung abzuleisten war. Ein Vergleich zwischen der Anzahl der Vorlesungs- und Übungsstunden in den Pflichtfächern des reinen Vermessungswesens nach den Studienplänen von 1921 und 1938 zeigt, dass die Zahl der Vorlesungsstunden von 24 auf 34 und die der Übungsstunden von 47 auf 75 gestiegen ist.

Die Erhöhung der Zahl der Vorlesungsstunden beruht hauptsächlich in der Aufgliederung von Grundvorlesungen in mehrere Spezialvorlesungen, hiervon wird vor allem das Gebiet der höheren Geodäsie, des Kartenwesens und der Photogrammetrie betroffen. Die Steigerung der Übungsstunden ist eine Folge der Ausarbeitung eines größeren Wissensstoffes und einer gründlicheren Vertiefung in die einzelnen Sondergebiete.

Um den dauernd gewachsenen Aufgaben- und Tätigkeitsbereich und die Leistungen des Lehrpersonals richtig würdigen zu können, verdient darauf hingewiesen zu werden, dass dabei die Anzahl der Lehrkräfte fast dieselbe geblieben war wie vor der Einführung der Studienreform für Vermessungsingenieure im Jahre 1921.

So standen im Sommersemester 1939 folgende Lehrkräfte zur Verfügung:

- ein Ordinarius, zugleich Direktor des Geodätischen Instituts (Prof. Schlötzer),
- ein beamteter a. o. Prof. und Abteilungsleiter (Prof. Merkel),
- ein Privatdozent im Nebenamt (Katastervermessung) (Verm. Rat. Dr.-Ing. Herrmann),
- ein Vollassistent (Verm. Assessor Girkens).

Mit Lehraufträgen beauftragt waren weiterhin:

- Für das Fachgebiet Vermessungswesen: Leiter der Abt. Landesvermessung beim Badischen Finanz- und Wirtschaftsministerium Oberreg. Rat Backfisch.
- Für das Fachgebiet Kommunales Liegenschafts- und Vermessungswesen: Stadtoberbaurat Dr.-Ing. Beck.

Der Ausbruch des 2. Weltkrieges im Herbst 1939 unterbrach jäh die Arbeit des Geodätischen Instituts. Prof. Merkel und andere Lehrkräfte sowie der größte Teil der Studierenden wurden sofort zum Kriegsdienst einberufen. Die Lehrtätigkeit ruhte fast vollkommen und beschränkte sich in den folgenden Kriegsjahren im wesentlichen darauf, von der Wehrmacht zum Abschluss ihres Studiums beurlaubten Kriegsteilnehmern die Ablegung der Diplomhauptprüfung zu ermöglichen.

1940 fand aus diesem Anlass noch eine Hauptvermessungsübung II unter Leitung von Dr.-Ing. Herrmann in Bergzabern statt. Danach verödeten Lehrsäle und Unterrichtsräume immer mehr, bis sie bei dem großen Fliegerangriff im Herbst 1944, dem die meisten Gebäude der Technischen Hochschule zum Opfer fielen, nahezu völlig zerstört wurden. Das Geodätische Institut wurde daraufhin nach der Gemeinde Eigeltingen im Landkreis Stockach evakuiert, wo es notdürftig untergebracht werden konnte.

Prof. Schlötzer erlebte dort mit seinen wenigen Mitarbeitern das Kriegsende. Ihre Rückkehr nach Karlsruhe und die Rückführung der verlagerten Geräte und Einrichtungsgegenstände bot allerdings besondere Schwierigkeiten und konnte deshalb erst im Frühjahr 1946 verwirklicht werden.

Die technische Ausrüstung des Instituts wurde in diesen Jahren zwischen den beiden Weltkriegen stets allen neuzeitlichen Entwicklungen und Erfordernissen angepasst, sodass im praktischen Unterricht das vorhandene Instrumentarium und die sonstige Ausstattung immer dem neuesten Stand entsprachen. Umfangreiche Neuanschaffungen erforderte dabei der jüngste Zweig der Geodäsie, die Photogrammetrie. Sie machte die Einrichtung einer besonderen Abteilung unter der Leitung des 1938 zum a. o. Professor ernannten Regierungsbaurates Dr.-Ing. Merkel notwendig, der sich 1928 mit der Schrift: "Die geodätischen Arbeiten Christian Mayers in der Kurpfalz – ein Beitrag zur Geschichte und Genauigkeit der Landesaufnahme im 18. Jahrhundert" habilitiert hatte. Dieser Abteilung stand bis 1939 eine photogrammetrische Feldausrüstung (Phototheodolit mit Zubehör), ein Stereokomparator, das Modell eines Stereogrammen, ein Entzerrungsgerät SEG I und ein Kleinautograph mit Profilzeichenvorrichtung für Zwecke des Unterrichts und der praktischen Auswertung zur Verfügung.

Unmittelbar nach dem 1. Weltkrieg war das Geodätische Institut zunächst in denselben Räumen im Aulabau untergebracht wie vorher. Außerdem standen für den geodätisch-astronomischen Unterricht nach dem 1. Weltkrieg zwei Observatorien zur Verfügung. Eines war das alte, noch von Prof. Jordan auf dem Hauptbau der Hochschule errichtete Observatorium (Abb. 7). Es war in seinem oberen Teil ein einfacher Stahlrippenbau mit seitlich herabklappbaren Glasfenstern und verglastem Schiebedach, in dessen Mitte ein steinerner Beobachtungspfeiler stand. Dieses Observatorium wurde im Krieg zerstört und nicht wieder aufgebaut. Von gewissem historischem Interesse ist zu wissen, dass dieses Observatorium sich unmittelbar über dem ehemaligen Karzerraum der Hochschule befand, der aus der Zeit stammte, als Rektor und Senat wie an den anderen Hohen Schulen Deutschlands noch eine große Disziplinargewalt über die Studierenden besaßen. Der Karzer, der im 2. Weltkrieg ein Raub der Flammen wurde, war ein großer, unbenutzter und mäßig erhellter Raum, dessen einst weißgetünchte Seitenwände mit oft humorvollen und beziehungsreichen Bemerkungen, teilweise gekonnten Zeichnungen, Verbindungselementen und sonstigen Marginalien studentischen Übermutes und Zeitvertreibs aus längst vergangenen Jahren bunt geziert war.

Das zweite Observatorium mit großem Passageinstrument und zugehöriger Mirenanlage stand im Garten des Aulabaues hinter seiner Nord-Ost-Ecke (Abb. 9). Es war ein stabiler



Abb. 7: Observatorium auf dem Hauptgebäude.

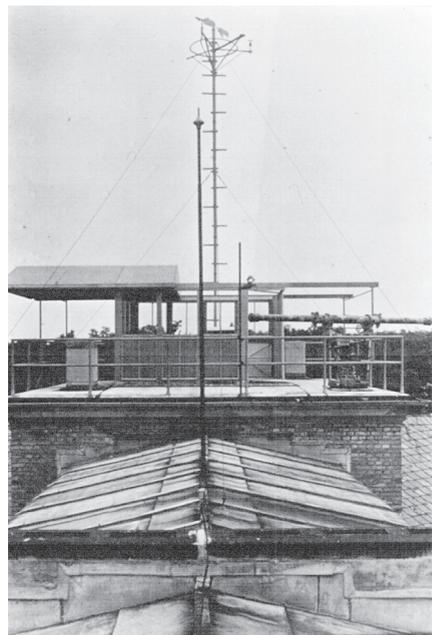


Abb. 8: Observatorium auf dem Aulabau (1936).

Wellblechbau auf steinerne Unterbau, mit einem verschiebbaren Dach versehen und diente geodätischen Messungen und vorwiegend nächtlichen astronomischen Beobachtungen. Auch dieses Observatorium besteht heute nicht mehr; es wurde im Zuge der Aus- und Neubauten im Hochschulgelände beseitigt.

Im Jahre 1936 wurde auf dem Dach des Aulabaus ein drittes und größeres Observatorium für astronomisch-geodätische Zwecke errichtet (Abb. 8), das noch heute, wesentlich erweitert, in Benutzung ist. Für alle Observatorien war in den Kellerräumen eine besondere Uhren- und Zeitempfangsanlage untergebracht. Dort waren an besonderen, möglichst erschütterungsfreien Steinfeilern Präzisionsuhren für Sternzeit und mittlere Sonnenzeit angebracht. Stand und Gang dieser Uhren konnten sowohl durch unmittelbare Messungen am Passageinstrument als auch durch Empfang drahtloser Zeitangaben der Sternwarte der Universität Heidelberg auf dem Königstuhl unter Benützung des Chronographen oder auch nach der akustischen Koinzidenzmethode von Zeitsignalen der Sendestationen Bordeaux, Rugby und Nauen bestimmt und einer ständigen Überwachung unterzogen werden.

Ein Komparatorraum zur exakten Längenbestimmung und zum Vergleich von End- und Strichmaßen in den Kellerräumen mit den darin untergebrachten technischen Hilfsgeräten vervollständigten damals die Einrichtungen.

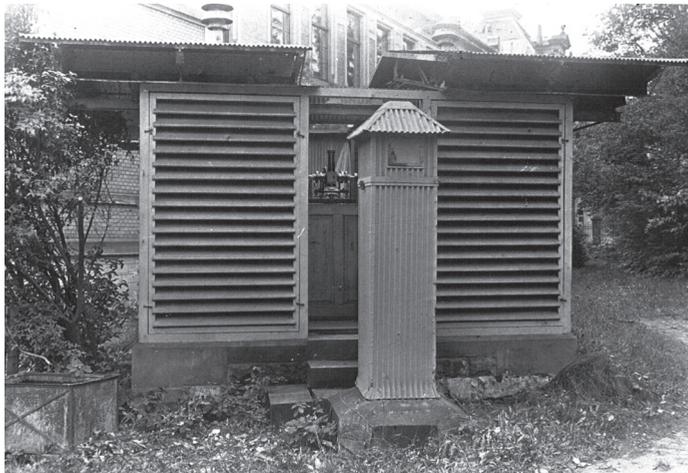


Abb. 9: Observatorium mit Passageinstrument hinter dem Aulabau.

Wiederaufbau (1945 - 1968)

Eugen Kuntz¹

Das Geodätische Institut hat den 2. Weltkrieg ohne nennenswerte Verluste überstanden. Als im Jahre 1944 die Luftangriffe auf Karlsruhe zunahmen, entschloss sich der damalige Direktor Prof. Schlötzer, das Institut zu verlagern, um die empfindlichen geodätischen Messinstrumente und die Werkstattmaschinen vor einer eventuellen Zerstörung zu bewahren und für seine Mitarbeiter angenehmere Arbeitsbedingungen zu schaffen. Der damalige Assistent Dr. Breunig und der Werkstattleiter Schmitt fanden geeignete Räumlichkeiten in Eigeltingen bei Singen am Hohentwiel im Gasthaus Lamm und in der Kolonialwarenhandlung Bächler.

Zu Kriegsende wurden die wertvollsten Instrumente und wichtigsten Maschinenteile vorübergehend vergraben, um sie einer Beschlagnahme durch die Besatzungsmacht zu entziehen. Wie aus dem damaligen Schriftverkehr hervorgeht, waren tatsächlich in den ersten Nachkriegsmo-naten immer wieder Verhandlungen notwendig, um den Abtransport von Institutsinventar zu verhindern. Die Rückverlagerung des Instituts konnte wegen der seinerzeit sehr schwierigen Verkehrsverhältnisse erst im Sommersemester 1946 vorgenommen werden.

In Karlsruhe sah es zu dieser Zeit sehr trostlos aus. Wer in den Jahren 1946 und 1947 sein Studium begann oder – unterbrochen durch den Krieg – fortsetzte, wird sich noch lebhaft an den großen Trümmerhaufen erinnern, der den Eingang zum Aulabau versperrte. An der Südostecke des Gebäudes war ein Fenster bis zum Flurboden aufgebrochen und diente in Verbindung mit einer "Hühnerleiter" als Eingang. Viele Hochschulgebäude waren zerstört. Die wenigen zur Verfügung stehenden Hörsäle waren ständig überfüllt. Wer sich nicht mit einem Stehplatz begnügen wollte, musste schon Stunden vor Vorlesungsbeginn anstehen.

In dieser für die Gesamthochschule sehr schwierigen Situation war es für das Geodätische Institut ein glücklicher Umstand, dass die früheren Räume noch beziehbar waren, wenn auch

¹ Überarbeiteter Beitrag aus der Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts aus dem Jahr 1993

die Fensterscheiben zum größten Teil fehlten. Die Wohnungslage in der zerstörten Stadt war katastrophal und so ist es nicht verwunderlich, dass der Institutsdirektor, der Werkstattleiter und der Hausmeister vorübergehend ihre Wohnungen in Institutsräumen einrichten mussten.

Zur Beschleunigung der notwendigen Aufräumarbeiten war innerhalb der Hochschule Selbsthilfe erforderlich. Jeder arbeitsfähige Student musste bis zum Jahre 1949 vor seiner endgültigen Zulassung zum Studium einen Aufbaudienst bis zu 400 Stunden ableisten. Es fehlte aber nicht nur an Arbeitskräften, sondern vor allem an Baumaterialien. Wie schleppend in den ersten Nachkriegsjahren die Aufbauarbeiten voranschritten, geht deutlich aus einem Antrag vom Oktober 1949, also vier Jahre nach Kriegsende, hervor, in dem das Bauamt dringend gebeten wird, die Fensterscheiben im Flur wieder einzusetzen, um dort die Praktika der starken Nachkriegssemester wegen Mangel an Übungssälen durchführen zu können.

Der Aufbau und die Aufstockung des Aulagebäudes begannen erst Anfang der fünfziger Jahre. Im Bereich des Geodätischen Instituts entstand ein neues Observatorium und ein geräumiges Messdach mit insgesamt 7 Beobachtungspfeilern. An der Ostseite wurde ein Licht- und Luftschacht für die Kellerräume angelegt. An der Nordseite wurden neue Werkstatt Räume eingerichtet. Dabei war es trotz anfänglicher Schwierigkeiten (Denkmalschutz) möglich, eine Fensterverbreiterung durchzuführen und damit die Arbeitsbedingungen für die Werkstattangehörigen zu verbessern. Die Räumlichkeiten des Instituts konnten im Zuge des Wiederaufbaus nur sehr beschränkt erweitert werden, im Wesentlichen nur durch einige kleine Behelfsräume, die sog. "Denkerzellen", die im südlichen Flur abgeteilt wurden, den neuen "Jordan-Hörsaal" und einige Kellerräume im Nordwestflügel des Aulabaus.

Auch ein im ersten 5-Jahresplan vorgesehener und schon teilweise geplanter Institutsneubau von 55 m Länge mit 4 Stockwerken – in einem 5. Stockwerk sollte das Meteorologische Institut untergebracht werden – wurde von der damaligen Baukommission mit der Begründung abgelehnt, dass bei Auszug der Mathematiker aus dem Aulabau, für die ein Neubau genehmigt war, genügend Platz für den Ausbau der Architektur und Geodäsie zur Verfügung stünde. So blieb zunächst nur die Möglichkeit, das im Zuge der Intensivierung der Lehre und Forschung und des allgemeinen Ausbaus der Hochschulen ständig zunehmende wissenschaftliche Personal, besonders auch das 1960 neu gegründete Institut für Photogrammetrie und Topographie, durch Ausbau und Umbau der vorhandenen Institutsräume unterzubringen.

Der bis dahin im Erdgeschoss gelegene Instrumentenraum und die Bibliothek wurden in den Keller verlegt. Alle Räume einschließlich des Kellerganges wurden instand gesetzt, die Werkstatt neu eingerichtet und dabei die Maschinen von Transmissionsantrieb auf Einzelantrieb umgestellt. Es konnte ein moderner Geräteausgaberaum eingerichtet werden. Der Uhrenraum,

wichtig für die Erdbebenwarte und die astronomisch-geodätischen Beobachtungen, wurde umgebaut und klimatisiert. Die wertvollste Erweiterung erfuhren die Institutseinrichtungen zweifellos durch den Bau eines neuen unterirdischen Komparatorkellers mit Spezialeinrichtungen zur Prüfung von Invardrähten und Messbändern. Dem Komparatorkeller ist ein geräumiger Klimaraum angeschlossen, in dem Untersuchungen bei Temperaturen von -40°C bis $+45^{\circ}\text{C}$ durchgeführt werden können.

Die erdrückende Enge im Geodätischen Institut musste bis Herbst 1966 ertragen werden. Zu dieser Zeit zogen die Mathematiker in einen Neubau um. Einige dadurch freiwerdende Räume wurden dem Geodätischen und Photogrammetrischen Institut zugesprochen. Außerdem konnte der im Januar 1966 neu eingerichtete Lehrstuhl für astronomische und elektronische Geodäsie im "Wachterbau" in der Kaiserstraße Nr. 14 in unmittelbarer Nähe des Aulabaus private Räume anmieten. Wenn auch der augenblickliche Zustand durch die Trennung in eine "Zentrale" und eine "Außenstelle" verständlicherweise sehr viele Nachteile hat und der erforderliche Raumbedarf bei weitem nicht erfüllt ist, so bedeutet diese Lösung doch eine gewisse Verbesserung der Arbeitsbedingungen für das Institutspersonal. Leider konnte der große Engpass – Bereitstellung ausreichender Übungs- und Arbeitsräume für die Studenten – bis heute (1968) nicht behoben werden.

Anfang 1964 kam erneut ein Institutsneubau ins Gespräch. Der Bedarfsplan wurde bereits vorgelegt und von der Hochschule anerkannt. Allerdings ist das Projekt infolge der gegenwärtigen Finanzkrise auf unbestimmte Zeit zurückgestellt. Es bleibt nur die Hoffnung auf ein baldiges Ende der finanziellen Einschränkungen, damit eines Tages doch noch ein eigener zeitgemäßer Institutsneubau zur Verfügung steht.

Lehre und Forschung

Das Geodätische Institut hat seine durch die Wirren des zu Ende gehenden Krieges für ein Jahr unterbrochene Unterrichtstätigkeit zum Sommersemester 1946 wieder aufgenommen. Das Institutspersonal bestand zu dieser Zeit lediglich aus dem Institutsdirektor Prof. Schlötzer, dem wissenschaftlichen Assistenten Dipl.-Ing. W. Stahl, dem Leiter der institutseigenen feinmechanischen Werkstatt F. Schmitt und zwei Lehrlingen.

Diese für einen geordneten Lehr- und Übungsbetrieb eines Hochschulinstituts untragbaren Verhältnisse konnten aber rasch verbessert werden. Prof. Merkel (Abb. 10), der seit 1938 den o. a. Lehrstuhl für Geodäsie am Institut innehatte, stellte sich sofort nach seiner Rückkehr aus dem Kriege seiner alten Wirkungsstätte wieder zur Verfügung, obwohl er 1943 einen Ruf als

ordentlicher Professor für Geodäsie an die Technische Hochschule München erhalten, durch die Kriegsereignisse seine Arbeit aber dort noch nicht aufgenommen hatte. Auf ausdrücklichen Wunsch der Technischen Hochschule Karlsruhe blieb Prof. Merkel auch weiterhin seiner langjährigen Wirkungsstätte treu.

Der Initiative der Professoren Schlötzer und Merkel ist es zu danken, dass auch schnell eine Reihe von Lehrbeauftragten in den Unterrichtsbetrieb eingeschaltet werden konnte (vgl. Tab. 4). Im Sommersemester 1949 habilitierte sich der Regierungsbaurat am Badischen Staatstechnikum Karlsruhe Dr.-Ing. H. Bodemüller für das Fachgebiet Höhere Geodäsie und zwei Jahre später der Regierungsvermessungsrat K. O. Raab für das Fachgebiet Photogrammetrie und Topographie.

Das Geodätische Institut verfügte damals auch über zwei Planstellen für wissenschaftliche Assistenten, die allerdings zur Betreuung der Übungen und Praktika bei weitem nicht ausreichten. Es waren daher neben einer größeren Anzahl von Hilfsassistenten laufend junge Diplom-Ingenieure als wissenschaftliche Hilfskräfte beschäftigt, mit monatlichen Vergütungen, die bei nur 200.- DM lagen. Neben dem schon genannten Werkstattpersonal gehörten nur noch eine Sekretärin und der technische Angestellte V. Schieferdecker zum Institut.

Im Wintersemester 1951/52 folgte der Priv. Doz. Dr.-Ing. H. Bodemüller einem Ruf als Ordinarius an die Technische Hochschule Braunschweig. Ein Jahr später wurde Prof. Schlötzer emeritiert und Prof. Merkel übernahm die Leitung des Instituts und der Erdbebenwarte. Prof.

Tab. 4: Zusammensetzung des Lehrkörpers am Geodätischen Institut im Jahre 1951.

Dozent	Fachgebiet
o. Prof. A. Schlötzer	Vermessungskunde I Landesvermessung Ausgleichsrechnung
o. Prof. H. Merkel	Vermessungskunde II Sphärische Astronomie Kartenprojektionslehre
Oberregierungsbaurat u. apl. Prof. habil. K. Hermann	Katastrertechnik
Priv. Doz. Dr.-Ing. H. Bodemüller	Erdmessung
Priv. Doz. Dr.-Ing. K. O. Raab (ab 1959 apl. Prof.)	Photogrammetrie
Stadt. Ob. Baurat Dr.-Ing. F. Beck (ab 1953 Honorar Prof.)	Kommunales Liegenschafts- und Vermessungswesen
Regierungsvermessungsrat R. Grossmann	Feldbereinigung
Regierungsvermessungsassistent R. Heitz	Plan und Geländezeichnen
Direktor J. Michel (Kunstdruckerei Künstlerbund)	Reproduktionstechnik

Schlötzer, der wohl allen seinen Schülern durch den großen Ideenreichtum an instrumentellen Neuentwicklungen in Erinnerung bleiben wird und der selbst einen beachtlichen Teil seiner Arbeitszeit in der feinmechanischen Werkstatt zugebracht hat, war auch nach seiner Emeritierung noch lange Jahre dem Institut und seiner Werkstatt in Treue verbunden. Er starb am 11.03.1963 im 78. Lebensjahr.

Auf den durch die Emeritierung von Prof. Schlötzer freigewordenen Lehrstuhl wurde im Sommersemester 1953 der Priv. Doz. Dr.-Ing. H. Lichte (Abb. 11) berufen und wenig später zum gleichberechtigten Institutsdirektor ernannt. Prof. Lichte war seit Kriegsende als Oberingenieur im Geodätischen Institut der Technischen Hochschule Hannover tätig gewesen und hatte kurz vor seiner Berufung die Leitung der Kartographischen Abteilung im Landesvermessungsamt Niedersachsen übernommen. Prof. Lichte hielt ab Sommersemester 1953 die Vorlesungen über Landesvermessung, Erdmessung und Ausgleichsrechnung und unter dem Titel "Radargeodäsie" erstmals eine Vorlesung über neue elektronische Entfernungsmessverfahren, die in den folgenden Jahren noch eine geradezu stürmische Entwicklung erfahren sollten. Daneben hat er den Lehrbetrieb durch die Einführung von geodätischen Seminaren und Kolloquien erweitert.



Abb. 10: Prof. Heinrich Merkel
(★28.10.1889, +12.09.1965)

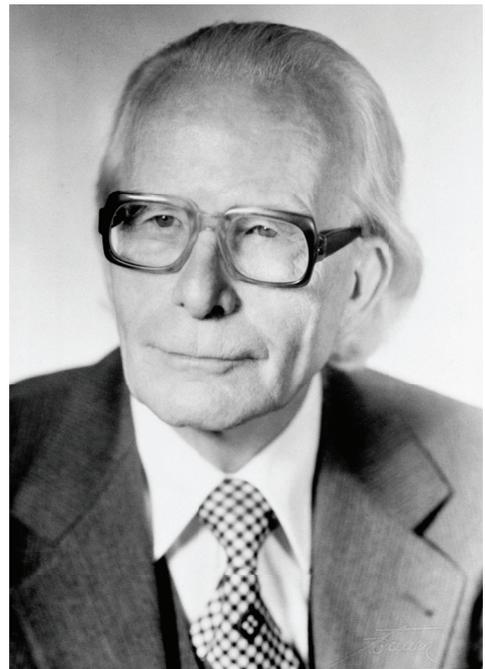


Abb. 11: Prof. Heinrich Lichte
(★08.04.1910, +31.12.1988)

Ein Lehrauftrag über Probleme der höheren Geodäsie war in den Jahren 1954/55 an den damaligen Oberregierungsrat am Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG) und heutigen Ordinarius für theoretische Geodäsie an der Universität Bonn Prof. H. Wolf vergeben.

Aber auch zwei vorhandene Lehrstühle für Geodäsie waren auf die Dauer nicht in der Lage einen geordneten und fruchtbaren Lehr- und Forschungsbetrieb aufrecht zu erhalten. An den Geodätischen Instituten anderer Hochschulen bestanden zu jener Zeit zum Teil schon drei und auch vier Lehrstühle. Das hatte die Professoren Schlötzer und Merkel bereits 1951 veranlasst, einen Antrag auf Schaffung eines neuen Lehrstuhls für Photogrammetrie und Kartographie zu stellen. Aber erst im Jahre 1960 wurde dieser neue Lehrstuhl bereitgestellt.

Im Jahre 1958 wurde Prof. Merkel emeritiert. Er konnte allerdings weiterhin bei bester Gesundheit seine Vorlesungen halten; die ihm ganz besonders lieb gewordene "Geschichte des Vermessungswesens" las er sogar bis zum Wintersemester 1964/65. Prof. Merkel starb nach kurzer Krankheit am 12. September 1965 im Alter von nahezu 76 Jahren.

Seine ehemaligen Schüler und Assistenten werden sich in Dankbarkeit immer gerne an den Lehrer und Menschen Merkel zurückerinnern. Er verstand es, seine Vorlesungen, die im Laufe der Jahre das ganze Fachgebiet der Geodäsie überdeckten, nach Inhalt und Form stets vorbildlich zu gestalten. Aber Prof. Merkel war nicht nur ein hervorragender Lehrer für seine Studenten und ein verständnisvoller Vorgesetzter für seine Assistenten, er hatte trotz der umfassenden Lehrtätigkeit immer auch ein offenes Ohr für persönliche Sorgen und war jedem zugleich ein väterlicher Freund. Besondere Verdienste hat sich Prof. Merkel durch den Ausbau der Hauptvermessungsübungen, die alljährlich zum Ende des Sommersemesters in Furtwangen im Schwarzwald stattfinden, und durch die Modernisierung der unter seiner Leitung stehenden Erdbebenwarte erworben. Seine zahlreichen Veröffentlichungen bezeugen eine intensive wissenschaftliche Arbeit auf fast allen Zweigen der Geodäsie. Auch am Berufsleben nahm Prof. Merkel immer regen Anteil. Von 1929 bis 1932 war er 1. Vorsitzender des Landesvereins Baden des Deutschen Vereins für Vermessungswesen. Viele Jahre war er auch Vorsitzender der Arbeitsgemeinschaft der deutschen Hochschullehrer für Geodäsie. Ihm ist es in erster Linie zu verdanken, dass eine reichseinheitliche Prüfungsordnung für Studierende des Vermessungswesens erlassen wurde. Ferner war Prof. Merkel führend an den Arbeiten der internationalen Bodenseekonferenz, einer Vereinigung der Hochschullehrer für Geodäsie der an den Bodensee angrenzenden Länder, beteiligt.

Der Emeritierung von Prof. Merkel folgten zwei Neuberufungen. Zum 01.09.1959 nahm der damalige Privatdozent und Oberingenieur am Institut für Vermessungskunde der Technischen Universität Berlin, Dr.-Ing. H. Draheim, den an ihn ergangenen Ruf an. Er übernahm

die Vorlesungen "Geodätische Astronomie", "Kartennetzentwürfe", "Vermessungskunde II", "Ausgleichsrechnung" und den theoretischen Teil der Vorlesung über "Landesvermessung". Anfang des Jahres 1960 wurde Prof. K. Schwidefsky, wissenschaftlicher Mitarbeiter der Firma Carl Zeiss, Oberkochen, Ordinarius auf dem neuen Lehrstuhl für Photogrammetrie und Topographie. Damit erhielt die Photogrammetrie, die bisher im Geodätischen Institut besonders von Prof. Merkel und Prof. Raab in Lehre und Forschung betreut worden war, eine eigene, ihrer Bedeutung entsprechende Pflegestelle.

In der Betreuung der durch Lehrbeauftragte vertretenen, ausgesprochen praxisnahen Fachgebiete sind im Laufe der Jahre die folgenden Veränderungen eingetreten: Als Nachfolger von R. Grossmann übernahm ab Wintersemester 1954/55 der damalige Oberregierungsrat und spätere Oberregierungsminister Dipl.-Ing. K. Wieser die Vorlesungen und Übungen zur Flurbereinigung. Er wurde 1961 zum Honorar-Professor ernannt. Zur Verstärkung der bis dahin etwas stiefmütterlich behandelten Gebiete der Topographie und Kartographie erhielt im Jahre 1958 der Oberstudiendirektor am Seminar für Studienreferendare beim Oberprüfungsamt Dr. phil. nat. F. Pfrommer einen Lehrauftrag für "Allgemeine Topographie und Kartographie". Dr. Pfrommer wurde 1964 zum Honorar-Professor ernannt. Dazu kam 1960 ein weiterer Lehrauftrag für "Amtliche Topographie und Kartographie", den der damalige Oberregierungsvermessungsrat und heutige Ministerialrat am Innenministerium Baden-Württemberg Dipl.-Ing. A. Knäble übernahm.

Im gleichen Jahr wurde eine weitere neue Pflichtvorlesung eingeführt: "Lochkarten und Rechenanlagen im Vermessungswesen". Den Lehrauftrag erhielt der Leiter für technisch-wissenschaftliche Anwendungen im Rechenzentrum der IBM Deutschland in Sindelfingen Dipl.-Ing. G. Klietsch. Mit Gründung des Instituts für Photogrammetrie und Topographie wurde Prof. K. O. Raab an Stelle seiner bis dahin gehaltenen photogrammetrischen Vorlesungen ein Lehrauftrag über Katastertechnik erteilt. Als Nachfolger von Prof. Beck übernahm ab 1962 der Leiter des Städt. Vermessungsamtes Karlsruhe, Stadt. Verm. Direktor Dipl.-Ing. H. Schilling, die Vorlesung "Kommunales Vermessungs- und Liegenschaftswesen". Ein weiterer Lehrauftrag "Grundstücksbewertung und Bodenordnung" wurde im gleichen Jahr an den Oberbaurat Dr.-Ing. W. Böser vergeben. Spezielle Lehraufträge zur Vertiefung der Grundvorlesungen sind ab 1962 erteilt an die Institutsangehörigen Akad. Oberrat Dr.-Ing. H. Mälzer: "Ergänzungen zur Ausgleichsrechnung", "Geodätisches Rechnen I" und "Gravimetrie" und Akad. Oberrat Dr.-Ing. D. Möller: "Höhenmessung" und "Ingenieurvermessung".

Diese nüchterne Skizze bis Anfang der 60er Jahre zeigt, dass das Institut stets bestrebt ist, frühzeitig der allgemeinen Entwicklung im Vermessungswesen durch eine entsprechende

Erweiterung des Lehrplans Rechnung zu tragen und auch Praktiker in der Lehre zu Worte kommen zu lassen. In jüngster Zeit sind darüber hinaus zwei wesentlich neue Fachgebiete hinzugekommen. Die elektronische Entfernungsmessung mit Mikrowellen und Lichtwellen steht heute mindestens gleichwertig neben den klassischen Längenmessverfahren. Zum anderen eröffnen die künstlichen Erdsatelliten auf zweierlei Weise, geometrisch oder dynamisch genützt, neue Möglichkeiten für eine genaue Bestimmung von Größe und Gestalt unserer Erde.

Schon im Jahre 1962 haben die damaligen Direktoren des Geodätischen Instituts zur intensiven Betreuung dieser neuen Fachgebiete einen weiteren Lehrstuhl beantragt, der im Fünfjahresplan der Hochschule für "Sondergebiete der Geodäsie" vorgesehen und im Weißbuch des Wissenschaftsrates für Karlsruhe empfohlen war. Er konnte Ende des Jahres 1965 durch die Berufung des bereits am Institut arbeitenden Wissenschaftlichen Rates, Priv. Doz. Dr.-Ing. E. Kuntz, besetzt werden. Prof. Kuntz war bis 1961 Regierungsvermessungsrat am Landesvermessungsamt Rheinland Pfalz. Er betreut gegenwärtig (1968) in Vorlesungen und Übungen die Fachgebiete "Kartennetzentwürfe", "Astronomisch geodätische Ortsbestimmung", "Satellitengeodäsie" und "Geodätisches Rechnen II".

Es ist nicht verwunderlich, dass sich bei der ständig wachsenden Stofffülle die Dauer des Studiums von 8 Semestern im Jahre 1950 im Durchschnitt auf 9 - 10 Semester im Jahre 1967 verlängert hatte und dass dabei die Studenten trotz der Verlängerung noch über ein normal zumutbares Maß beansprucht waren. Diese Tatsache und die Erkenntnis, dass die Aufgabe der Hochschule nur in der Vermittlung solider wissenschaftlicher Grundlagen und in der Anleitung zum "Studieren", d. h. zum selbständigen wissenschaftlichen Arbeiten liegen kann, und dass ein akademisch gebildeter Ingenieur in unserer Welt des ständigen Fortschritts in Wissenschaft und Forschung ohnehin gezwungen ist, sein Studium auch außerhalb der Hochschule fortzusetzen, hat die Leitung des Geodätischen Instituts in Übereinstimmung mit den Empfehlungen des Wissenschaftsrats veranlasst, im Jahre 1967 eine Studienreform durchzuführen mit dem Ziel: Reduzierung der stundenmäßigen Belastung unter gleichzeitiger Intensivierung der Grundlagen. Dabei schien es unumgänglich der großen Breite unseres Fachgebietes, das von der Flurbereinigung und Landesplanung bis zur Himmelsmechanik in der Satellitengeodäsie reicht, dadurch Rechnung zu tragen, dass unter Beibehaltung eines gemeinsamen Schlusszeugnisses nach dem Vordiplom zwei Vertieferrichtungen angeboten werden:

- a) **Vermessungswesen**, mit vertiefter Ausbildung in allen Disziplinen, die sich mit kleineren Teilen der Erdoberfläche einschließlich der Planung befassen,
- b) **Geodäsie**, mit vertiefter mathematisch physikalischer Ausbildung in allen Disziplinen, die unsere Erde als Ganzes betrachten.

Der neue Studienplan entlastet allein schon dadurch, dass er den verschiedenen Begabungen der Studenten – mehr planerisch-juristisch oder mehr mathematisch-physikalisch – entgegenkommt. Er ist auf 8 Semester abgestellt. Die Gesamtzahl der Wochenstunden beträgt 193 gegenüber 212 im alten Studienplan. Es ist natürlich auch möglich, beide Vertieferrichtungen nebeneinander zu studieren. Die Belastung liegt dann bei 217 Wochenstunden, also mit nur 5 Wochenstunden über der Zahl des alten Studienplanes.

In Verbindung mit dem neuen Studienplan wurde auch eine neue Prüfungsordnung aufgestellt. Durch Einführung von Klausuren, die praktisch eine Vorwegnahme der bisherigen schriftlichen Prüfungen darstellen, kann der Student laufend seinen Leistungsstand kontrollieren. Außerdem kann eine ganze Reihe von Fächern, sobald die Vorlesungen und Übungen dafür abgeschlossen sind, durch Semesterprüfungen vorzeitig erledigt werden. Dadurch wird es künftig möglich, die Vorprüfung in zwei Teilen zu je 3 Fächern und die Hauptprüfung in nur einem Teil mit insgesamt 6 Fächern abzulegen.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass das Geodätische Institut seit der Berufung von Prof. Lichte mit bestem Erfolg eine Art "Department System" praktiziert. Die heutigen drei Ordinarien sind gleichberechtigte Institutsdirektoren. Sie teilen sich abwechselnd die Verwaltungsaufgaben und haben die Lehrstuhlgrenzen auch gegenüber dem Kreis der wissenschaftlichen Assistenten weitgehend abgebaut. Die Zahl der wissenschaftlichen Assistenten konnte in den letzten Jahren im Zuge des Ausbaus der Hochschulen nach den Empfehlungen des Wissenschaftsrats auf 4 bis 5 Planstellen pro Lehrstuhl erhöht werden. So ist es heute möglich, neben der Betreuung der Übungen und Praktika die wissenschaftliche Institutsarbeit sehr viel stärker als früher voranzutragen. Die Zuständigkeiten für Übungen und Praktika werden von Semester zu Semester neu koordiniert, sodass die Möglichkeit eines Wechsels vom Aufgabenbereich des einen Lehrstuhls zu dem des anderen eröffnet wird und die Assistentenzeit zur Vertiefung auf der ganzen Breite des Fachgebietes genützt werden kann.

Der Überblick über die Lehre und Forschung wäre unvollständig, wenn nicht erwähnt werden würde, dass das Geodätische Institut auch die Bauingenieure und Architekten mit den Grundvorlesungen und Übungen in Vermessungskunde zu betreuen hat.

Die Vorlesungen für Bauingenieure sind bisher immer von Ordinarien gehalten worden. Nach Prof. Schlötzer übernahm Prof. Merkel und danach Prof. Lichte die entsprechenden Verpflichtungen. Die Architekten wurden seit Kriegsende ausschließlich in besonderem Lehrauftrag von dem jeweils dienstältesten Assistenten in Übungsvorlesungen betreut. In chronologischer Folge lautet die Namensliste: Stahl (1948 - 49), Hemminghaus (1949 - 51), Jäckel (1951 - 53), Neubauer (1953 - 57), Böser (1957 - 58), Kuntz (1958 - 59), Steiner (1959 - 62), Möller seit 1962.

Die seit Kriegsende durchgeführten Forschungsarbeiten des Instituts fanden zu einem großen Teil ihren Niederschlag in den bis heute abgeschlossenen Dissertationen, die an gesonderter Stelle dieser Festschrift aufgeführt sind. Als Beitrag zum Projekt "Oberer Erdmantel" sind im Rheingraben astronomische und gravimetrische Arbeiten geplant (Anm. der Red.: und auch realisiert wurden). In geeignet angelegten Testnetzen werden neue elektronische Entfernungsmessgeräte untersucht und besonders der Einfluss der meteorologischen Verhältnisse auf die Messergebnisse studiert. Seit Anfang 1968 hat das Institut eine Satellitenbeobachtungsstation eingerichtet und arbeitet aktiv in der europäischen Satellitentriangulation mit.

Ein Teil der wissenschaftlichen Institutsarbeit wurde bemerkenswert befruchtet durch die Übernahme von Vermessungsaufgaben in Entwicklungsländern. 1954 war Prof. Lichte zu großräumigen wasserwirtschaftlichen Vermessungen in Liberia, 1959 zu Pipeline-Trassierungen im Nildelta. In den Jahren 1961/62 wurden in Äthiopien Kartenunterlagen in den Maßstäben 1:5000, 1:20000 und 1:50000 erarbeitet, bei denen besonders die Probleme der barometrischen Höhenmessung studiert werden konnten.

Mit besonderem Stolz dürfen wir die Teilnahme von Institutsangehörigen an den Internationalen Glaziologischen Grönlandexpeditionen (EGIG) der Jahre 1959 und 1968 erwähnen. Karlsruhe stellte jeweils die Gruppe "Nivellement". Im Jahre 1959 nahmen unter der Leitung von Herrn Dr. Mälzer die Herren Möller, Pfrommer und Schnädelbach teil. Im Augenblick, in dem diese Zeilen geschrieben werden, wird über das grönländische Inlandeis ein Wiederholungsnivellement getragen. Daran beteiligt sind die Herren Stober, Thiele und Zick unter der Leitung von Herrn Seckel. Auch diese Arbeiten werden zu wissenschaftlichen Untersuchungen über Bewegungen der großen Eismassen Anlass geben.

Selbstverständlich nehmen die drei Institutsdirektoren über ihre Pflichten in Lehre und Forschung im Geodätischen Institut hinausgehend aktiv am Gesamtleben der Hochschule und am nationalen und internationalen geodätischen Fachleben teil. So war Prof. Lichte von 1958 - 1960 Dekan der Fakultät für Bauwesen und 1962 - 1964 Vertreter des Großen Rates im Senat. Prof. Draheim war 1965 Leiter der Abteilung für Bauingenieurwesen und 1966

Dekan der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Im Jubiläumsjahr wurde Prof. Draheim zum Rektor der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH) gewählt. Prof. Lichte hat viele Jahre beim Bauausschuss der Hochschule mitgewirkt und gehört zur Zeit noch der Haushaltskommission an, während Prof. Draheim 5 Jahre lang das Presseamt der Hochschule leitete, Mitglied der sogenannten zweiten Ausbaukommission war und heute Vorsitzender des Bibliotheksausschusses ist. Die besonderen Interessen von Prof. Draheim am Bibliothekswesen und an der Dokumentation haben es mit sich gebracht, dass er seit einigen Jahren Mitglied des Bibliotheksausschusses der Deutschen Forschungsgemeinschaft ist, dem Beirat des Instituts für Dokumentationswesen der Max-Planck-Gesellschaft angehört und zur Zeit (1968) den Vorsitz des Beirates der Zentralstelle für Maschinelle Dokumentation der Max-Planck-Gesellschaft innehat. Wegen seiner praktischen Tätigkeit in der geodätischen Entwicklungshilfe in Afrika wird Prof. Lichte ständig zur Beratung des Bundesinnenministeriums in Fragen der technischen Hilfe für Entwicklungsländer zugezogen.



Abb. 12: Prof. Heinz Draheim
(*05.11.1915, †25.04.2012)

Die drei Institutsdirektoren sind Mitglieder der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und beteiligen sich an der internationalen Zusammenarbeit, besonders im Rahmen der Internationalen Assoziation für Geodäsie, der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik, der Bodenseekonferenz und der Fédération Internationale des Géomètres (FIG). Sie gehören mehreren Spezialstudiengruppen der Internationalen Assoziation für Geodäsie an. Prof. Draheim (Abb. 12) ist zur Zeit Präsident der Kommission "Vermessungsinstrumente und Verfahren, Photogrammetrie und Kartographie" der FIG. Im September 1968 wurde er auf dem 12. Internationalen Geometerkongress in London zum Präsidenten der FIG für die Jahre 1970 - 1972 gewählt.

Die Beteiligung von Angehörigen des Geodätischen Instituts an den Internationalen Grönlandexpeditionen der Jahre 1959 und 1968 ist dem aktiven Interesse von Prof. Lichte an glaziologischen Fragen zu danken. Prof. Lichte gehört zu den Begründern der "Internationalen Glaziologischen Grönland Expedition", ist seit vielen Jahren Mitglied des Direktions-Komitees und zur Zeit Vizepräsident.

Es ist nur natürlich, dass das Geodätische Institut besonders im eigenen Universitätsbereich die Zusammenarbeit mit anderen Lehrstühlen sucht. So hat Prof. Draheim in der zweiten Ausbaukommission besonders die Errichtung eines Instituts betrieben, in dem die Zusammenarbeit aller interessierten Lehrstühle für den Bereich der Raumordnung, der Landesplanung und des Städtebaus gepflegt wird. In dem 1965 gegründeten "Institut für Regionalwissenschaft", an dem zur Zeit 10 Lehrstühle aus drei verschiedenen Fakultäten beteiligt sind, vertritt Prof. Draheim als einer der Direktoren den vermessungstechnischen Anteil. Es kann festgestellt werden, dass sich die Bestrebungen zu einer engen Zusammenarbeit aller geowissenschaftlichen Lehrstühle der Universität verstärkt haben. In aufeinander abgestimmten geophysikalischen, geologischen und geodätischen Arbeiten im Bereich des Oberrheingrabens sind diese Bestrebungen auch bereits über die Bekundung des gegenseitigen guten Willens hinausgetreten.

Die Entwicklung des Geodätischen Instituts (1968 - 1993)

Bernhard Heck¹

1 Vorbemerkungen

Der Zeitraum zwischen dem hundertjährigen Jubiläum des Geodätischen Instituts im Jahre 1968 und heute ist durch eine stürmische Entwicklung im gesamten Bereich des Vermessungswesens gekennzeichnet, welche auch die Arbeiten des Instituts maßgeblich beeinflusst hat. Als primäre Ursachen für die tiefgreifenden Veränderungen in den letzten drei Jahrzehnten sind die Entwicklungen in der Halbleiter- und Lasertechnik sowie auf dem Gebiet der ultrahochgenauen Zeitmessung zu nennen, welche in Verbindung mit rechnergestützten Arbeitsweisen wiederum die Mess- und Auswertetechniken in Geodäsie und Vermessungswesen vollständig umgestalteten.

In diesem Zeitraum haben sich zunächst die Verfahren der elektromagnetischen Entfernungsmessung in allen Bereichen des Vermessungswesens durchgesetzt. In Verbindung mit den Fortschritten im Bereich der Elektronik wurden diese ständig weiterentwickelt bis hin zu den modernen elektronischen Theodoliten und Tachymetern in ihrer sich heute bietenden Vielfalt. In jüngster Zeit spielt die Nutzung von Satellitenmessverfahren eine immer größere Rolle; während die Satellitengeodäsie in den sechziger und siebziger Jahren lediglich für wissenschaftliche Zielsetzungen und Vermessungsaufgaben in großregionalen Gebieten interessant war, hat diese seit Anfang der 1980er Jahre im Zuge der Nutzung des Global Positioning System (GPS) ihren Elfenbeinturm verlassen und ist gegenwärtig dabei, das gesamte Vermessungswesen bis hin zur Kataster- und Ingenieurvermessung zu revolutionieren.

¹ Überarbeiteter Beitrag aus der Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts aus dem Jahr 1993

Diese Fortschritte wären nicht denkbar ohne die Entwicklung leistungsfähiger elektronischer Rechenanlagen, welche heute in den verschiedensten Varianten (von Universal-Großrechnern, Vektor- und Parallelrechnern, Workstations und Personal Computern bis hin zu kleinen Taschenrechnern) zur Verfügung stehen. Die Rechengeschwindigkeiten und Speicherkapazitäten der heutigen Rechnergenerationen sind mit den Möglichkeiten ihrer vor 25 Jahren eingesetzten Vorgänger in keiner Beziehung mehr vergleichbar.

Die bis heute noch keineswegs abgeschlossenen Entwicklungen in den drei genannten Bereichen – Elektronik, GPS und EDV – sind im Begriff, das klassische Arbeitsfeld des Vermessungsingenieurs von Grund auf umzugestalten und haben dies teilweise schon getan. Auch die Lehre und Forschung am Geodätischen Institut in den letzten 25 Jahren wurde durch diese Trends maßgeblich gestaltet; ureigenstes Kennzeichen universitärer Lehre und Forschung ist gerade die Ausrichtung an den aktuellen, mehr noch an den für die Zukunft erwarteten Möglichkeiten und Aufgabenbereichen. Diesen Anforderungen ist durch eine Fortschreibung und Reform der Studienpläne und Prüfungsordnungen frühzeitig Rechnung zu tragen, um die Studierenden in ausreichendem Maße auf die Praxis von morgen vorbereiten zu können.

Zu den in den sechziger Jahren aktuellen Lehr- und Forschungsgebieten sind im Laufe der letzten 25 Jahre z. B. die Anwendung numerischer Methoden, der rechnergestützte Entwurf sowie die Analyse und Optimierung geodätischer Netze, die Auswertung von Deformationsmessungen mit statistischen Verfahren, die dreidimensionale Positionsbestimmung mit GPS, die hochgenaue Geoidbestimmung zur Ableitung von Gebrauchshöhen sowie das weite Feld der CAD- und Geoinformationssysteme hinzugekommen, um nur die für die Praxis des Vermessungswesens wichtigsten Bereiche zu nennen. Dagegen haben andere Gebiete, wie z. B. die Rechenverfahren der klassischen Landesvermessung oder die Beobachtungsverfahren der astronomischen Ortsbestimmung, inzwischen vielfach an Bedeutung verloren.

Als weiteres wesentliches Moment der geodätischen Forschung und Lehre im vergangenen Vierteljahrhundert kommt die Forderung nach verstärkter interdisziplinärer und internationaler Zusammenarbeit hinzu. Die Geodäsie als die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche hat prinzipiell einen globalen Auftrag, welcher nicht an Staatsgrenzen aufhören kann. Gerade die auf dem Hintergrund der Wiedervereinigung Deutschlands und der Einführung des europäischen Binnenmarktes notwendig gewordene Vereinheitlichung der geodätischen Grundlagen macht die Aktualität internationaler Zusammenarbeit überdeutlich. Darüber hinaus werden die von der Geodäsie bereitgestellten Ergebnisse in zunehmendem Maße von anderen Geowissenschaften – wie Geophysik, Geologie und Ozeanographie – genutzt; um den Informationsgehalt dieser Daten bestmöglich ausschöpfen zu können, ist eine

interdisziplinäre Zusammenarbeit unumgänglich. Verstärkt werden diese Tendenzen durch die Anwendung moderner VLBI-(Very Long Baseline Interferometry) und Satellitenverfahren, welche bereits grundsätzlich eine Kooperation auf globaler Basis voraussetzen.

2 Personelle und strukturelle Veränderungen

Die im Beitrag von E. Kuntz "Die Geschichte des Geodätischen Instituts 1945 - 1968" in der Festschrift zum 100-jährigen Bestehen beschriebene Struktur des Geodätischen Instituts blieb seit 1968 ohne einschneidende Änderungen. Die gemeinsame Leitung mit abwechselnder Wahrnehmung der Verwaltungsaufgaben unter den Professoren des Instituts hat sich bewährt. Auch die Haushaltsmittel werden gemeinsam verwaltet, was eine sehr effektive Haushaltsführung gestattet. Das wissenschaftliche Personal, das in den sechziger Jahren im Zuge des Ausbaues der Hochschulen stark erweitert worden war und um 1968 seinen Höchststand erreicht hatte, gehört übergeordnet zum Institut und kann weitgehend unter Berücksichtigung der eigenen Schwerpunkte in Forschung und Lehre sehr flexibel eingesetzt werden.

Im Jahre 1968 war Prof. H. Draheim zum Rektor der Universität gewählt worden. Dieses Amt bekleidete er 15 Jahre lang, bis Dezember 1983, zum Wohle der Universität. Trotz seiner vielfältigen Verpflichtungen als Rektor hat Prof. Draheim den Kontakt zum Geodätischen Institut nie verloren. Auch in dieser Zeit hielt er weiterhin Vorlesungen und Prüfungen ab; insbesondere die Vorlesung "Deutsches Vermessungswesen", die er in der ihm eigenen, immer lebendigen Art und Weise – durchzogen mit Anekdoten über die Urväter des Vermessungswesens – vortrug, lag ihm sehr am Herzen. Zu seiner Entlastung von den Dienstaufgaben am Geodätischen Institut wurde ab 1970 eine Lehrstuhlvertretung eingerichtet, welche zunächst von Dr.-Ing. H. Mälzer (Abb. 14), zu diesem Zeitpunkt Akademischer Oberrat, ab 1972 Wissenschaftlicher Rat und Professor am Geodätischen Institut, wahrgenommen wurde. Dieser übernahm damit gleichzeitig die Vorlesungen im Fach Ausgleichsrechnung. Von 1979 bis 1983 wurde diese Lehrstuhlvertretung Dr.-Ing. habil. G. Schmitt, damals C2-Professor am Institut, übertragen. Die Vorlesungen im Bereich der Mathematischen Geodäsie, dem theoretischen Teil der Lehrveranstaltungen zur Landesvermessung, wurden ab 1969 von Prof. E. Kuntz (Abb. 13) abgehalten.

Die Zusammenarbeit mit anderen Geowissenschaften, insbesondere der Geophysik, konnte seit 1970 mit dem Aufbau des von den Geodätischen und Geophysikalischen Instituten der Universitäten Karlsruhe und Stuttgart getragenen Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsobservatoriums Schiltach im Schwarzwald auf eine neue Grundlage gestellt werden. An der



Abb. 13: Prof. Eugen Kuntz
(*06.03.1925, †05.02.1998)



Abb. 14: Prof. Hermann Mälzer
(*19.04.1925, †20.08.2018)

Errichtung dieses Observatoriums, über welches von M. Westerhaus et al., „Das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach (BFO)“ S. 255ff in dieser Festschrift ausführlich berichtet wird, war von geodätischer Seite H. Mälzer maßgeblich beteiligt. In Anerkennung seiner Verdienste um die geowissenschaftliche Zusammenarbeit wurde er im Jahre 1979 zum (Persönlichen) Ordentlichen Professor ernannt, verbunden mit der Errichtung eines Lehrstuhls für Geodynamik am Geodätischen Institut. Von 1972 bis 1988 war Prof. Mälzer Leiter des inzwischen weltweit anerkannten Geowissenschaftlichen Observatoriums. Der enge Kontakt zu anderen geowissenschaftlichen Instituten der Universität Karlsruhe führte ferner zur Einrichtung eines Geophysikalischen Feldpraktikums, an welchem neben Studierenden der Geowissenschaften in engerem Sinne auch Geodäsiestudenten teilnehmen können. Im Rahmen dieses an deutschen Hochschulen einmaligen Praktikums wird von Seiten des Geodätischen Instituts der Teil "Gravimetrie" betreut, während das Geophysikalische Institut weitere geophysikalische Messverfahren vorstellt.

Im Jahre 1978 wurde Prof. H. Lichte emeritiert. Da die Professur nicht sofort wieder besetzt werden konnte, übernahm er noch für ein weiteres Jahr die Vertretung des Lehrstuhls Geodäsie I. Auch nach seiner Emeritierung blieb Prof. Lichte noch lange dem Institut verbunden. Er verstarb nach längerer Krankheit am 31.12.1988 im Alter von 78 Jahren.

Während seiner 25-jährigen Lehr- und Forschungstätigkeit am Geodätischen Institut betreute Prof. Lichte 25 Doktoranden. Viele dieser wissenschaftlichen Arbeiten waren durch praktische Tätigkeiten des Instituts angeregt worden und hatten unmittelbaren Praxisbezug, eine Maxime, die bis in die heutige Zeit hinein im Vordergrund vieler Institutsarbeiten steht. Prof. Lichte leitete von 1968 bis 1970 als Dekan die Fakultät für Bauwesen und war viele Jahre als deren Haushaltsbeauftragter tätig. Neben weiteren Universitätsgremien gehörte er u. a. der Bodenseekonferenz, der Schulkommission der Westdeutschen Rektorenkonferenz und dem Beirat für Vermessung und Kartographie in der Entwicklungshilfe beim Bundesministerium des Innern an. Ferner amtierte er von 1972 bis 1974 als Vorsitzender der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und war maßgeblich an der Neustrukturierung des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts beteiligt.

Auf den durch die Emeritierung von Prof. Lichte freigewordenen Lehrstuhl wurde zum Sommersemester 1979 Ir. J. van Mierlo (Abb. 16) berufen, der zuvor in der Abteilung Geodäsie der Technischen Hochschule Delft/Niederlande gearbeitet hatte. Gleichzeitig wurden die Lehraufgaben der nunmehr vier Lehrstühle neu verteilt: Prof. van Mierlo übernahm die Vorlesungen in Vermessungskunde und Ausgleichsrechnung sowie die Betreuung der Lehrveranstaltungen in Vermessungskunde für die Bauingenieure. Die zuvor am Lehrstuhl für Geodäsie I angesiedelten Vorlesungen in Physikalischer Geodäsie (Erdmessung) wurden nun von Prof. Mälzer abgehalten, der auch eine Vertiefervorlesung im Fach Geodynamik anbot; da inzwischen den Studierenden des Faches Geophysik die Möglichkeit gegeben war, als Nebenfach im Diplomstudiengang das Fach "Geodäsie" zu wählen, gehören seither auch regelmäßig Geophysiker zu den Hörern dieser Veranstaltungen. Gleichzeitig wurden die Vorlesungen im Fach "Mathematische Geodäsie" von Prof. Schmitt übernommen. Diese Neugliederung der Aufgabenbereiche des Instituts, bestehend aus den Lehrstühlen für Geodäsie I (Prof. van Mierlo), Geodäsie II (Prof. Draheim, Lehrstuhlvertretung Prof. Schmitt), Astronomische und Elektronische Geodäsie (Prof. Kuntz) und Geodynamik (Prof. Mälzer) blieb bis 1988 praktisch unverändert.

Kurz nach Ablauf seiner Rektoratszeit wurde Prof. Draheim im Jahre 1984 emeritiert. Im Zusammenhang mit seinen vielfältigen bildungs- und hochschulpolitischen Aktivitäten hat Prof. Draheim in seinem Berufsleben zahlreiche Ehrungen im In- und Ausland erfahren. Erwähnt sei hier die Verleihung des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland Erster Klasse (1981), der Ehrenmedaille der Stadt Karlsruhe (1982) und der Verdienstmedaille des Landes Baden-Württemberg (1984). In Anerkennung seiner Verdienste um den Ausbau der Partnerschaft zwischen der Universität Karlsruhe und der TU Budapest wurde ihm von dieser

Hochschule 1973 die Ehrendoktorwürde verliehen. Von 1971 bis 1977 war er als erster und bisher einziger Geodät Mitglied des Wissenschaftsrates.

Der Emeritierung von Prof. Draheim folgte die Berufung von Prof. Schmitt im Jahre 1988, wobei der zugehörige Lehrstuhl umbenannt wurde und seither die Bezeichnung "Lehrstuhl für Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie" trägt. Zum Lehrgebiet von Prof. Schmitt gehören neben der mathematischen Geodäsie (Landesvermessung und Kartennetzentwürfe) die Bereiche "Geodätische Netzoptimierung", "Rechentechnische Probleme in der Geodäsie" sowie "Elektronische Datenverarbeitung im Vermessungswesen".

Ebenfalls im Jahr 1988 wurde Prof. Mälzer in den Ruhestand versetzt. Als Nachfolger auf die in eine C3-Professur umgewandelte Stelle wurde zum 1.10.1988 Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. H.-G. Wenzel, zuvor Akad. Rat am Institut für Erdmessung der Universität Hannover, berufen; Prof. Wenzel (Abb. 15) ist seither Leiter des Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsobservatoriums Schiltach und hält die Vorlesungen in den Fächern "Geodynamik", "Gravimetrie" und "Einführung in die Elektronik geodätischer Instrumente" ab.

Im Jahre 1991 wurde Prof. Kuntz emeritiert. Auf diesen Lehrstuhl mit der nunmehr geänderten Benennung "Physikalische und Satellitengeodäsie" wurde zum 01.06.1991 der Priv.-Doz. Dr.-



Abb. 15: Prof. Hans-Georg Wenzel
(*03.02.1945, +11.11.1999)

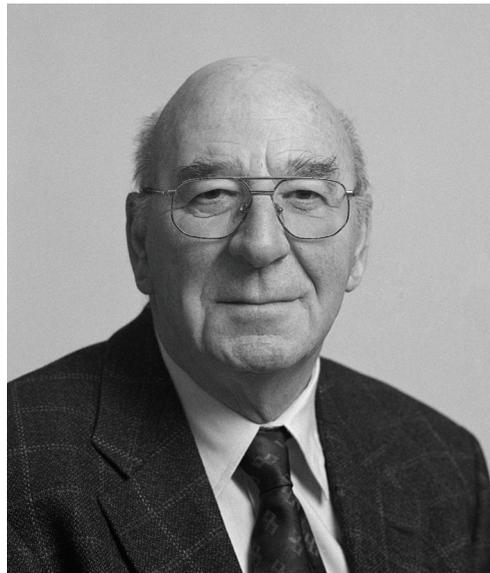


Abb. 16: Prof. Johannes van Mierlo
(*27.09.1935, +12.06.2015)

Ing. habil. B. Heck, zuvor am Geodätischen Institut der Universität Stuttgart tätig, berufen. Das Lehrgebiet von Prof. Heck umfasst den Bereich der Physikalischen Geodäsie (Erdmessung), der Geodätischen Astronomie und der Satellitengeodäsie einschließlich der Messverfahren in Verbindung mit dem NAVSTAR Global Positioning System (GPS).

Im Jubiläumsjahr 1993 erfreuen sich die drei emeritierten bzw. in den Ruhestand versetzten Professoren noch guter Gesundheit und pflegen enge Kontakte mit dem Geodätischen Institut, wo ihnen auch weiterhin ein Arbeitsplatz zur Verfügung steht. Prof. Draheim hat neben vielen weiteren Ämtern den Vorsitz der "Gesellschaft zur Pflege wissenschaftlicher Kontakte im Hause Heinrich Hertz" der Universität Karlsruhe inne. Prof. Mälzer ist stellvertretender Vorsitzender im Vorstand des Karlsruher Studentendienstes e. V. sowie Mitglied des Verwaltungsrates des Studentenwerks Karlsruhe.

Im Bereich der wissenschaftlichen Mitarbeiter gab es in den Jahren von 1968 bis 1993 naturgemäß starke Veränderungen, die hier nicht im Detail nachgezeichnet werden können. Im Zuge von Sparmaßnahmen bzw. von Umstrukturierungen innerhalb der Universität fielen in den siebziger und achtziger Jahren mehrere wissenschaftliche Mitarbeiterstellen und eine Sekretärinnenstelle dem Rotstift zum Opfer, sodass trotz höherer Studentenzahlen weniger Lehrpersonal zur Verfügung steht. Der Mittelbau hat auch heute noch seine – im Verhältnis zu anderen Hochschulen – traditionell starke Stellung; er wirkt mit in den verschiedenen Institutskommissionen und hat beratende Funktion in der kollegialen Institutsleitung. Die Lehre im Bereich der Übungen und Praktika wird überwiegend vom akademischen Mittelbau getragen. Einige der Grundvorlesungen werden im Rahmen von Lehraufträgen durch Angehörige des Mittelbaus abgehalten. Weiterhin werden die ausgesprochen praxisnahen Fachgebiete, wie beispielsweise Kataster, Neuordnung des Ländlichen Raumes, Bodenordnung und -bewertung und Kommunales Vermessungs- und Liegenschaftswesen, durch Lehrbeauftragte aus dem Bereich des behördlichen Vermessungswesens betreut.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass mehrere ehemalige wissenschaftliche Mitarbeiter des Instituts inzwischen an andere wissenschaftliche Hochschulen als Universitätsprofessoren berufen wurden (Prof. W. Caspary, Univ. der Bundeswehr, München; Prof. H. Kahmen, TU Wien; Prof. D. Möller, TU Braunschweig; Prof. G. Oberholzer, Univ. der Bundeswehr, München; Prof. H. Schlemmer, TH Darmstadt; Prof. K. Schnädelbach, TU München). Eine weitere Anzahl der im Berichtszeitraum am Institut bediensteten Mitarbeiter sind heute als Professoren an verschiedenen Fachhochschulen sowie in herausgehobenen Stellungen in der Vermessungsverwaltung und an Hochschulinstituten tätig.

Seit 1968 entstanden am hiesigen Geodätischen Institut 36 Dissertationen, die überwiegend von wissenschaftlichen Mitarbeitern angefertigt wurden. Im gleichen Zeitraum wurden fünf Habilitationen abgeschlossen. Ferner wurde auf Antrag des Geodätischen Instituts hin im Jahre 1975 durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen die Ehrendoktorwürde an Frau I. Fischer und Herrn C. A. Whitten, beide USA, verliehen.

Die in der Festschrift zur Hundertjahrfeier ausgesprochene Hoffnung auf ein eigenes Institutsgebäude hat sich bis heute leider nicht erfüllt. Nachdem der Hochschulausbau in den siebziger und achtziger Jahren aus finanziellen Gründen fast vollständig gestoppt wurde, ist ein Institutsneubau auf absehbare Zeit nicht in Sicht. Ende der siebziger Jahre bestand die wohlbegründete Aussicht, dass das Geodätische Institut in der renovierten "Alten Anorganischen Chemie", dem heutigen Kollegiengebäude am Ehrenhof, neue Räume erhalten würde. Nach einer Revision des Raumbedarfs Anfang der achtziger Jahre bestand immerhin noch die vage Hoffnung, dass das Geodätische Institut nach einem vorgesehenen Umzug von Instituten der Fakultät für Architektur in die sanierte "Alte Chemie" die Räume dieser Institute im Aulabau nutzen könnte. Leider wurden bereits vor der Fertigstellung der Renovierungsarbeiten im Jahre 1991 alle diese Hoffnungen zerstört, da nach einer erneuten Bedarfsanalyse sämtliche Räume der "Alten Chemie" an Institute aus Fakultäten mit weitaus stärker gestiegenen Studentenzahlen vergeben wurden.

So ist das Provisorium einer Trennung des Instituts in die "Zentrale" im Aulabau und die angemietete "Außenstelle" über der Post im Wachterbau an der Kaiserstraße vorerst wohl als Dauerzustand zu verstehen. Während sich die Diensträume der meisten wissenschaftlichen Mitarbeiter im Wachterbau befinden, sind im Aulabau die Vorlesungssäle und Seminarräume sowie der Messkeller, die Werkstatt und die Bibliothek untergebracht. Der ehemalige Uhrenraum im Keller des Aulabaus wurde inzwischen aufgelöst und der Werkstatt einverleibt; anstelle der ehemals für Zeitvergleiche verwendeten Pendeluhrn werden im Rahmen astronomischer Beobachtungen heute moderne Quarzuhrn eingesetzt, welche im Observatorium auf dem Messdach des Aulabaus installiert sind. Mit der Stilllegung der Erdbebenwarte 1989 ergab sich die Möglichkeit, den Vorraum als Übungsraum umzugestalten und den Pfeilerraum mit dem Nachbarraum als gravimetrisches Messlabor zu nutzen. In diesem Laborraum ist ferner ein Punkt des Deutschen Schweregrundnetzes DSGN76 untergebracht. In jüngster Zeit wird die Erdbebenwarte in ein kleines Institutsmuseum umgebaut. Ebenfalls im Aulabau befindet sich ein aus einem ehemaligen Seminarraum entstandener Arbeitsraum für Studenten, der seit 1992 in ein kleines Rechenzentrum mit vernetzten PCs und Workstations umgebaut wird, welche wiederum mit der Großrechenanlage des Rechenzentrums der Universität verbunden sind.

3 Forschung und Lehre

Bedingt durch die stürmische Entwicklung der geodätischen Mess- und Auswertetechnik in den vergangenen 25 Jahren, haben sich die am Geodätischen Institut bearbeiteten Forschungsschwerpunkte stark verlagert. Hauptthemen der Forschung um 1970 waren die Lösung der beiden geodätischen Hauptaufgaben auf dem Ellipsoid, insbesondere für große Entfernungen, die Auswertung von photographischen Satellitenaufnahmen sowie die astronomische Ortsbestimmung mit Hilfe der Photographie von Sterndurchgängen, die meteorologische Reduktion elektromagnetisch gemessener Strecken mittels atmosphärischer Modelle, die Erfassung rezenter Krustenbewegungen, die astrogeodätische Geoidbestimmung, Genauigkeitssteigerungen in der barometrischen Höhenmessung sowie Instrumentenuntersuchungen mit der 2m-Basislatte und an optischen bzw. elektromagnetischen Distanzmessern. Viele dieser Forschungsaktivitäten waren in nationale und internationale Programme eingebunden und längerfristig angelegt.

Von 1968 an beteiligte sich das Institut am europäischen Satellitenbeobachtungsprogramm WEST (Western European Satellite Triangulation), wobei auf dem Messdach des Instituts mit einer vom IGN in Paris gebauten Kamera photographische Satellitenaufnahmen durchgeführt wurden. Anhand von Simultanbeobachtungen zu den Ballonsatelliten ECHO-1, ECHO-2 und PAGEOS auf mehreren Stationen wurde erstmals ein homogenes europäisches Netz geschaffen; die dreidimensionalen Koordinaten der Beobachtungsstation Karlsruhe ergaben sich aus einer in München durchgeführten Gesamtausgleichung aller Beobachtungen mit einer für damalige Verhältnisse hervorragenden Genauigkeit von ca. 4 m. Mitte der siebziger Jahre verlor dieses erste in größerem Umfang angewandte Satellitenbeobachtungsverfahren mit dem Aufkommen der Dopplermethode stark an Bedeutung. Erst Ende der achtziger Jahre, als leistungsfähige GPS-Empfänger auf dem Markt waren, wurden von Seiten des Instituts wieder Satellitenbeobachtungen vorgenommen.

Seit 1967 wurde das im Gebiet des Oberrheingrabens gelegene "Testnetz Karlsruhe" mit wechselndem Instrumentarium beobachtet. Mit der Anlage des anfangs nur aus sechs Punkten bestehenden Netzes verfolgte man zunächst das Ziel, die damals neu auf dem Markt eingeführten EDM-Geräte (z. B. Tellurometer MRA-2 / MRA-4, Distomat DI 50, Geodimeter-8) zu testen und zu vergleichen sowie den Einfluss der Atmosphäre und der Bodenreflexionen auf die elektromagnetische Distanzmessung zu untersuchen. Die hohe Genauigkeit der im Testnetz gemessenen Strecken erweckte bald das Interesse der Geologen und Geophysiker, die damit einen Nachweis der vermuteten rezenter horizontalen Relativbewegungen der Grabenränder

erhofften. Leider (bzw. glücklicherweise) erreichen die zu erwartenden Bewegungsraten eine Größenordnung von nur etwa 1 mm pro Jahr, sodass – angesichts einer Messgenauigkeit von 2 - 3 cm – derzeit erst nach mehr als fünfzig Jahren ein statistisch gesicherter Nachweis der rezenten Bewegungen zu erwarten ist. Dennoch könnte das bisher gesammelte Datenmaterial einmal von unschätzbarem Wert bei künftigen Nachmessungen sein. Um das Netz auch geologisch gesichert zu verankern, wurde es in den siebziger Jahren auf elf Punkte erweitert. Obwohl das Testnetz für terrestrische Beobachtungen konzipiert wurde, sind einige Punkte auch für GPS-Messungen geeignet; seit 1988 wurde es mehrfach mit verschiedenen GPS-Empfängern beobachtet. Neben den geometrischen Bestimmungselementen wurden im Gebiet des Testnetzes auch Lotrichtungen und Schwerewerte gemessen, womit ein astrogeodätisches Geoid und Schwereanomalien berechnet sowie Studien zur Massen- und Dichteverteilung vorgenommen werden konnten.

Als weiteres dominierendes Forschungsthema ist die Bestimmung vertikaler rezenter Erdkrustenbewegungen zu nennen. Im Rahmen der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramme "Oberrheingraben-Projekt" und "Vertikalbewegungen und ihre Ursachen am Beispiel des Rheinischen Schildes" wurden von Seiten des Geodätischen Instituts von 1967 bis 1982 Wiederholungsnivellements analysiert. Auf der Grundlage von Nivellementsdaten, die von den Landesvermessungsämtern bereitgestellt wurden, konnte die Methodik bei der Ableitung von Höhenänderungen entscheidend verbessert werden; darüber hinaus wurden die erhaltenen Ergebnisse auch intensiv im geowissenschaftlichen Kontext für Interpretationszwecke genutzt.

Diese Arbeiten konnten innerhalb des 1981 eingerichteten, im wesentlichen von den geowissenschaftlichen Instituten der Universität Karlsruhe getragenen DFG-Sonderforschungsbereichs 108 "Spannung und Spannungsumwandlung in der Lithosphäre" fortgesetzt und auf den gesamten südwestdeutschen Raum ausgedehnt werden. Vom Geodätischen Institut wird innerhalb des noch laufenden Sonderforschungsbereichs das Teilprojekt "Kriechende Spannungsumwandlungen – rezente vertikale und horizontale Krustenbewegungen" (Projektleiter: 1981 - 1988 Prof. Mälzer, seit 1988 Prof. van Mierlo) bearbeitet. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden auf der Schwäbischen Alb in der Umgebung des Hohenzollerngrabens verschiedene lokale Testnetze angelegt und zunächst mit terrestrischen Verfahren, ab 1988 auch mit Hilfe von GPS-Beobachtungen in regelmäßigen zeitlichen Abständen ausgemessen. Neben horizontalen und vertikalen Verschiebungen der Netzpunkte werden auch eventuell vorhandene Schwereänderungen untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt des Teilprojektes ist seit 1991 die Messung und Analyse der sich von Triest (Italien) über Gemona und Villach bis zum Hohenpeißenberg bei München erstreckenden, ca. 400 km langen und 41 Punkte

umfassenden Alpen traverse auf der Basis von GPS-Beobachtungen. Zur Kontrolle der im Jahre 1991 erfolgten Nullmessung wurde im Sommer 1992 erneut eine Kampagne durchgeführt.

Numerische Untersuchungen zur Ableitung vertikaler rezenter Erdkrustenbewegungen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer) wurden auch vom DGK-Arbeitskreis "Rezente Krustenbewegungen" (Vorsitz: 1976 - 1990 Prof. Mälzer, ab 1991 Prof. van Mierlo) durchgeführt. Wesentlichen Anteil hatte das Geodätische Institut an der Erstellung einer im Jahre 1979 veröffentlichten Karte der rezenten Höhenänderungen (vertikalen Krustenbewegungen) in Westdeutschland.

Hand in Hand mit diesen Aktivitäten wurden auch die Auswertemodelle fortwährend verbessert und verfeinert. Anfang der siebziger Jahre wurde die Deformationsanalyse auf statistischer Grundlage entwickelt; das heute noch angewandte und in EDV-Programme umgesetzte "Karlsruher Konzept" der Deformationsanalyse geht auf diese Ansätze zurück. Auch die Planung und Analyse geodätischer Netze erfuhr in dieser Zeit mit der Einführung von Optimierungsstrategien, statistischen Verfahren zur Suche grober Beobachtungsfehler und der damit verbundenen Konzepte der inneren und äußeren Zuverlässigkeit wesentliche Erweiterungen in methodischer Hinsicht. Diese universellen, auf der Basis der mathematischen Statistik beruhenden Verfahren konnten sowohl für die Ableitung rezenter Krustenbewegungen, als auch für die Bestimmung von Bauwerksdeformationen sehr effektiv eingesetzt werden. In jüngster Zeit werden diese Studien auf den Bereich der GPS-Beobachtungen und deren Integration in bestehende terrestrische Netze ausgedehnt. Auch diese Arbeiten des Instituts sind größtenteils integriert in internationale Forschungsprojekte, die im Rahmen von Studiengruppen der FIG (Fédération Internationale des Géomètres), der IAG (International Association of Geodesy) und der Inter-Union Commissions of Geosciences bearbeitet wurden.

Angeregt und gefördert wurden diese wissenschaftlichen Untersuchungen nicht zuletzt durch Aufträge aus dem Gebiet der Überwachungsmessungen, die an das Institut herangetragen wurden. Die entwickelten Mess- und Auswerteverfahren wurden beispielsweise angewandt auf die Überwachung von Staudämmen und Staumauern, rutschgefährdeten Hängen, einsturzbetrohten historischen Bauwerken sowie von Gebieten, in denen rezente Erdkrusten- oder Eisbewegungen erwartet werden. Diese Projekte, welche von Institutsangehörigen, teilweise unter studentischer Beteiligung, durchgeführt wurden, führten die Teilnehmer bisher um die halbe Welt, vom europäischen Bereich (Italien, Rumänien, Ungarn) über den Nahen und Mittleren Osten (Türkei, Israel, Syrien, Irak, Pakistan) nach China, durch Süd- und Mittelamerika (Peru, Guatemala) nach Kanada und Grönland sowie in die arktischen und antarktischen Regionen. Viele dieser Vorhaben wurden und werden im Rahmen von offizi-

ellen Kooperationsverträgen mit in- und ausländischen Partnern durchgeführt. Besonders zu erwähnen ist die nunmehr zwanzigjährige Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut der Karlsruher Partnerschaftsuniversität Budapest auf dem Gebiet der Deformationsmessungen und -analysen; auf der Grundlage einer Institutskooperation wird seit 1984 der regelmäßige gegenseitige Austausch von Wissenschaftlern besonders gefördert. Längerfristige Vereinbarungen bestehen ferner mit der German-Israeli Foundation for Research and Development, dem Institut für hydroenergetische Studien und Projekte und der Geodätischen Forschungsgruppe der TH für Bauwesen, beide Bukarest, sowie dem an der Universität Karlsruhe eingerichteten DFG-Sonderforschungsbereich 315 "Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke".

Auch auf dem instrumentellen Sektor ist am Geodätischen Institut in den vergangenen 25 Jahren in erheblichem Maße Entwicklungs- und Forschungsarbeit geleistet worden. Diese reicht von Instrumenten- und Geräteprüfungen bei tiefen Temperaturen (Gravimeter, Barometer, Nivellierlatten) und Instrumentenuntersuchungen (EDM-Geräte, elektronische Tachymeter und Theodolite sowie GPS-Empfänger) über die Entwicklung elektronischer Feedbacksysteme für Gravimeter bis hin zur Entwicklung eines Laser-Interferenzkomparatorsystems zur Prüfung und Ermittlung der Strichverbesserungen von Nivellierlatten. Die Weiterführung der Arbeiten zur Genauigkeitssteigerung bei Nivellements resultierte schließlich in einer mit der Firma Nestle & Fischer/Dornstetten gemeinsam entwickelten Nivellierlatte, die praktisch keine Teilungsfehler aufweist. Als Ergebnis weiterer Untersuchungen zur digitalen Ablesung an Nivellierlatten resultierte eine für die Bauvermessung einsetzbare, inzwischen serienmäßig hergestellte Lasernivellierlatte.

Als weitere Schwerpunkte der Institutsarbeiten sind die Untersuchung und Weiterentwicklung teil- und vollautomatischer Industriemesssysteme und elektronischer Messverfahren für die Bauvermessung, die Bereitstellung von Verfahren zur Transformation zwischen verschiedenen in der Praxis angewandten Koordinatensystemen sowie die Nutzung von Analogien zwischen der Analyse und Optimierung geodätischer Netze und Eigenschwingungen elastischer Strukturen zu nennen. Auf dem Gebiet der Physikalischen Geodäsie sind vor allem die Arbeiten zur Theorie des Geodätischen Randwertproblems zu erwähnen, die sich von analytischen Lösungen zeitabhängiger Formulierungen und Untersuchungen zu nichtlinearen Effekten bis hin zur Anwendung moderner numerischer Verfahren auf der Grundlage der Randelementmethode erstrecken.

Immer wieder haben Mitglieder des Geodätischen Instituts in nationalen und internationalen Studiengruppen und Arbeitskreisen von Berufsverbänden mitgewirkt, so zum Beispiel in verschiedenen Spezialstudiengruppen der IAG – teilweise als Vorsitzende –, in Arbeitsgruppen

der FIG sowie in Arbeitskreisen des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) und der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK). Auch leitende Ämter in diesen Organisationen wurden von Angehörigen des Instituts übernommen. Von 1970 bis 1972 bekleidete Prof. Draheim das Amt des Präsidenten der FIG (seit 1974 Ehrenpräsident). Prof. Wenzel ist seit 1991 Präsident der Sektion III (Bestimmung des Schwerefeldes) innerhalb der IAG. Seit 1993 hat Prof. Schmitt die Funktion eines stellvertretenden DVW-Bundesvorsitzenden.

Die von den Mitgliedern des Geodätischen Instituts erarbeiteten Forschungsergebnisse wurden auf nationalen und internationalen Kongressen und Symposien präsentiert und in namhaften Fachzeitschriften publiziert. In diesem Zusammenhang ist hervorzuheben, dass die Schriftleitung der Zeitschrift "Allgemeine Vermessungs-Nachrichten" seit 1962 in den Händen von Prof. Draheim liegt; seit 1988 teilt er sich diese Aufgabe mit Prof. Schlemmer. Ebenfalls seit 1962 ist Prof. Draheim Herausgeber einer Buchreihe in der "Sammlung Wichmann". Seit 1991 ist Prof. Heck Mitglied im Editorial Board der internationalen geodätischen Fachzeitschriften "Bulletin Géodésique" und "manuscripta geodaetica".

Selbstverständlich sind gerade an einer wissenschaftlichen Hochschule die Inhalte der Lehrveranstaltungen ständig dem Fortschritt in der Forschung und den Veränderungen im beruflichen Umfeld anzupassen. Dabei ist zu beachten, dass das Universitätsstudium niemals reine Berufsausbildung sein kann, sondern primär die Berufsfähigkeit, nicht die Berufsfertigkeit zum Ziel haben muss. Infolgedessen ist an einer wissenschaftlichen Hochschule, mehr als an Fachhochschulen, eine Beschränkung auf die Grundlagen, d. h. auf das Wesentliche, notwendig; im Studium soll nicht möglichst viel Spezialwissen, sondern vielmehr wissenschaftliche Denk- und Arbeitsmethodik vermittelt werden. Ziel ist, die Studierenden auf die Praxis von morgen vorzubereiten und sie in die Lage zu versetzen, sich auf künftige Tätigkeitsfelder einzustellen.

An Qualitätsmerkmalen dieser Art haben sich jeweils die Studienpläne und Prüfungsordnungen zu orientieren, welche deshalb ständig reformiert und von Zeit zu Zeit gründlich novelliert werden müssen. Durch die Weiterentwicklung des ohnehin sehr breiten Tätigkeitsfeldes des Geodäten und Vermessungsingenieurs kamen in der Vergangenheit immer wieder neue Lehrveranstaltungen hinzu, ohne dass an anderen Stellen im gleichen Maße reduziert wurde, mit der Folge, dass sich die Studienzeiten immer mehr verlängerten. Im Jahre 1987 sah man sich am Geodätischen Institut einer ähnlichen Situation ausgesetzt wie bereits 1967: Eine Neuordnung des Studiums mit inzwischen auf mehr als 12 Semestern angestiegenen mittleren Studienzeiten war unumgänglich. Mit dem 1987 eingeführten neuen Studienplan kann jeder Studierende im Vertiefungsstudium seinen Neigungen entsprechend Lehrveranstaltungen aus dem Angebot des Geodätischen Instituts sowie anderer Universitätsinstitute selbst auswählen und zusam-

menstellen. Dieser Studienplan und die darauf abgestimmte Prüfungsordnung sollte – unter kontinuierlicher Anpassung durch kleinere Änderungen – wiederum den Anforderungen der nächsten beiden Jahrzehnte genügen.

Von 1968, als etwa 6.000 Studierende eingeschrieben waren, hat sich die Gesamtzahl der Studierenden an der Universität Karlsruhe kontinuierlich auf heute fast 22.000 erhöht. Glücklicherweise ist die Zahl der Geodäsiestudenten in diesem Zeitraum nicht im gleichen Maße gestiegen. Während im Jahre 1968 insgesamt 149 Studierende verzeichnet wurden, ist heute mit 192 der bisher höchste Stand erreicht; eine geringfügig niedrigere Zahl hatte sich bereits um 1977 eingestellt. Wie ein Blick auf die Entwicklung der Studentenzahlen, insbesondere der Studienanfänger, zeigt, ist die Zahl der Geodäsiestudenten stark mit dem Konjunkturverlauf auf dem Bausektor korreliert. In den letzten Jahren hat die Anzahl der Studienanfänger sprunghaft zugenommen. Während bis in die achtziger Jahre hinein der Frauenanteil nahezu verschwindend gering war, ist seit etwa 1985 eine steigende Tendenz zu verzeichnen; in den jüngsten Jahrgängen liegt dieser bei 20 bis 30 Prozent. Die Zahl der ausländischen Studierenden, von denen bisher die meisten aus Luxemburg stammten, war seit 1968 nahezu konstant und hat sich in den letzten Jahren eher verringert.

Schließlich sei auch noch das Engagement des Instituts auf dem Gebiet der beruflichen Fortbildung erwähnt. In jedem Wintersemester werden im Rahmen des Geodätischen Kolloquiums von namhaften Berufskollegen aus Wissenschaft und Praxis Vorträge angeboten, die in erster Linie den in der Praxis tätigen Kolleginnen und Kollegen einen Einblick in neue Entwicklungen vermitteln sollen. Darüber hinaus wurden bereits zweimal Seminare zu aktuellen, die berufliche Praxis betreffenden Themen am Geodätischen Institut veranstaltet. Das erste, im Jahre 1986 organisierte Seminar befasste sich mit der Beurteilung geodätischer Netze auf statistischer Grundlage und nahm Bezug auf die in Baden-Württemberg 1984 eingeführte AP-Vorschrift. Thema des zweiten, im Oktober 1991 abgehaltenen Seminars war "GPS und Integration von GPS in bestehende geodätische Netze", eine Problemstellung, die in der Vermessungspraxis immer mehr an Bedeutung gewinnt. Die große Resonanz, welche diese Seminare im Kreis der Berufskollegen fanden und Wiederholungen erforderlich machte, weist auf die Bedeutung solcher Veranstaltungen im Fadenkreuz von Wissenschaft und Praxis hin.

Der Verantwortung, die Zukunft der Geodäsie in Forschung und Lehre sowie in Wissenschaft und Praxis mitzugestalten, weiß sich das Geodätische Institut auch künftig verpflichtet.

Das Geodätische Institut (1993 - 2018)

**Martin Breunig, Bernhard Heck, Maria Hennes, Hansjörg Kutterer
und Günter Schmitt**

1 Vorbemerkungen

In den 25 Jahren von 1993 bis 2018 – über die Jahrtausendwende hinweg – haben sich die Methodik und das Instrumentarium der Geodäsie revolutionär weiterentwickelt. Dies betrifft sowohl neue Entwicklungen in der Satellitengeodäsie, vorangetrieben durch den Aufbau verschiedener globaler Satellitennavigationssysteme, insbesondere GPS, aber auch spezifische geodätische Satellitenmissionen wie GRACE, GOCE, TerraSAR-X und TanDEM-X als auch methodische Neuerungen in der Industrievermessung (Large Volume Metrology / Sensorik). Durch die ständig wachsende Menge an zu verarbeitenden Daten kommt zudem dem effizienten Management und der Verarbeitung großer Mengen georeferenzierter Daten eine besondere Bedeutung zu. Gleichbedeutend, wenn nicht gar in den letzten Jahren noch gestiegen ist die Notwendigkeit zur interdisziplinären Ausrichtung der Geodäsie. Die Geodäsie kann sich heute als Drehscheibe zwischen verschiedensten Disziplinen wie beispielsweise dem Bauingenieurwesen und den Geowissenschaften, aber auch dem Maschinenbau oder der Luft- und Raumfahrttechnik bezeichnen.

Auf die neuen Herausforderungen hat das Geodätische Institut auf vielfältige Weise reagiert: Zum Wintersemester 2010/11 wurde der Lehrstuhl für Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie umgewidmet in den Lehrstuhl für Geoinformatik (siehe auch Abschnitt "Strukturelle und personelle Veränderungen"), auf den Prof. Martin Breunig berufen wurde. Der Lehrstuhl versteht sich seither als bindendes Glied zwischen der Geodäsie, den Bauingenieur- und den Geowissenschaften. Die interdisziplinäre Arbeitsweise spiegelt sich auch in der DFG-Forschergruppe *3D Tracks* wider, von der später in dieser Festschrift noch die Rede sein wird. Die jüngsten Veränderungen betreffen den Lehrstuhl "Physikalische und Satellitengeodä-

sie", der zum Wintersemester 2018/19 im Zuge der Wiederbesetzung durch Prof. Hansjörg Kutterer in "Geodätische Erdsystemwissenschaft" umgewidmet wurde, verbunden mit einer Neuausrichtung des Lehr- und Forschungsgebiets sowie einer noch stärkeren Fokussierung auf geowissenschaftliche Themen.

Als der Lehrstuhl Geodäsie I im Jahre 2000 neu besetzt wurde, wurde mit der Umwidmung in "Vermessungskunde und Geodätische Sensorik" mit dem expliziten Verweis auf Sensorik bewusst die Tür in die dimensionelle Messtechnik geöffnet, wobei gleichfalls die Basisausbildung in Vermessungskunde auch für Nachbardisziplinen garantiert werden sollte. Heute versteht sich der Lehrstuhl als Teildisziplin der Metrologie, also der Wissenschaft des Messens (vgl. auch den Abschnitt "Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen" in diesem Band) und stellt die geodätischen Messtechniken in einem eher grundsätzlichen Kontext dar. Dies ermöglicht barrierefreie Interaktion mit anderen Ingenieurdisziplinen, vor allen Dingen der Large Volume Metrology (LVM) im Maschinenbau. In diesem Zusammenhang werden auch Entwicklungen von Messmitteln vorangetrieben.

2 Strukturelle und personelle Veränderungen

Der größte Einschnitt bezüglich der Struktur in den letzten 25 Jahren war sicherlich der Übergang von der Universität Karlsruhe (TH – Forschungsuniversität) zum Karlsruher Institut für Technologie (KIT), d. h. der Zusammenschluss der Universität Karlsruhe mit dem Forschungszentrum Karlsruhe im Jahre 2009. Neben den Fakultäten wurde nun vertikal eine *Bereichsebene* zwischen Präsidium und den Instituten eingezo-gen, die seither eine gewisse Doppelung der Gremienarbeit im Fakultätsrat bzw. Fakultätsvorstand und dem Bereichsrat zur Folge hat. Die KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, die 2002 durch die Zusammenführung der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen mit den geowissenschaftlichen Instituten entstanden war, ist nun im Bereich IV *Natürliche und gebaute Umwelt* des KIT mit der Fakultät für Architektur und den drei Helmholtz-Programmen *Atmosphäre und Klima*, *Erneuerbare Energien* sowie *Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen* vereint. Außerdem gehören die vier Institute für Meteorologie und Klimaforschung zu diesem Bereich. Dies eröffnet neue Perspektiven für Forschungsk Kooperationen und fördert den Austausch bzw. die Integration zwischen dem universitären und dem Helmholtz-Teil des KIT.

Am Geodätischen Institut wurde weiterhin die bewährte kollegiale Institutsleitung mit einer Sprecherin bzw. einem Sprecher beibehalten. Strukturelle Veränderungen wurden Mitte der 1990er Jahre mit der personellen Zuordnung des wissenschaftlichen Personals und eines

Großteils der Aversa zu den Lehrstühlen eingeführt, da die frühere zentralistische Verwaltung der Ressourcen nicht mehr den Anforderungen in Forschung und Lehre entsprach. Seither sind die Lehrstühle mit stärkeren organisatorischen Eigenständigkeiten ausgestattet, erfüllen aber weiterhin übergeordnete Aufgaben gemeinsam. Bedingt durch das Ausscheiden von Professoren gab es an allen Lehrstühlen personelle und inhaltliche Veränderungen. Nachdem Prof. Hans-Georg Wenzel im Jahre 1999 auf eine Professur an der Universität Hannover berufen worden war, wurde seine Stelle im Zuge von Einsparmaßnahmen im Zusammenhang mit dem "Solidarpakt" zwischen der Landesregierung und den baden-württembergischen Universitäten ersatzlos gestrichen. Der Aufgabenbereich seiner Professur (Gravimetrie und Geodynamik) einschließlich der Leitung des Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsobservatoriums Schiltach wurde daraufhin dem Lehrstuhl von Prof. Heck zugeschlagen. Im Jahre 2000 wurde Prof. Jan van Mierlo in den Ruhestand versetzt. Seine Nachfolgerin, Prof. Maria Hennes, wandte sich verstärkt dem Aufgabenbereich der Fertigungsmesstechnik und Large Volume Metrology zu, ohne dringende Aufgaben der Ingenieurgeodäsie, wie die der hochpräzisen automatischen und vor allen Dingen effizienten Bestimmung von Verknüpfungsvektoren ("local ties") zur Verknüpfung unterschiedlicher Raumverfahren auf Co-Location Sites zu vernachlässigen.

Prof. Günter Schmitt war von 1988 bis 2010 Inhaber des Lehrstuhls für Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie am Geodätischen Institut und in der Lehre insbesondere für die mathematische Geodäsie (Landesvermessung und Kartennetzentwürfe), Ausgleichsrechnung und Statistik, Geodätische Netzoptimierung, Rechentechnische Probleme in der Geodäsie sowie Elektronische Datenverarbeitung im Vermessungswesen verantwortlich. In der Forschung hat er sich u. a. aktiv in den Sonderforschungsbereich 461 *Starkbeben: von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen* eingebracht. Als Beitrag zu der geophysikalischen Grundlagenforschung der Starkbeben in der Vrancea Zone der Südostkarpaten wurde ein ganz Rumänien umfassendes GPS-Netz zur Aufdeckung rezenter Krustenbewegungen angelegt und über ein Jahrzehnt hinweg beobachtet. Ein weiteres Großprojekt sind die vom BMBF geförderten Verbundprojekte *Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstgewässer* und *Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) in Gunung Kidul, Java/Indonesien*. Hier ging es um die Realisierung einer Wasserförderanlage mit energieautarkem Antrieb der Förderpumpen durch das unterirdische Wasserkraftpotential zur Verbesserung der Versorgungslage in der Region. Der geodätische Beitrag umfasste u. a. die Erstellung geometrischer Grundlagen, die Einrichtung eines Geoinformationssystems und Spezialvermessungen.

Zum Wintersemester 2010/11 wurde aus dem bisherigen Lehrstuhl für Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie der Lehrstuhl für Geoinformatik eingerichtet, der sich fortan für

die Methodenentwicklung im Bereich der Modellierung, des Managements und der Analyse von Geodaten verantwortlich zeichnet. Von 2011 - 2018 leitete Prof. Breunig als Sprecher die interdisziplinäre DFG-Forschergruppe 1546 *3D Tracks* (Rechnergestützte kooperative Trassenplanung in mehrskaligen 3D-Stadt und Bauwerksmodellen), die Forschungsthemen aus der Modellierung und Simulation im Bauingenieurwesen (Lehrstühle Prof. Rank und Prof. Borrmann an der TU München), der Geoinformatik (Prof. Breunig am KIT und Prof. Kolbe an der TU München) sowie aus dem Gebiet der Computer Vision (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung am KIT, Prof. Hinz) vereinigte.

Mit dem Ende des Wintersemesters 2017/18 ging Prof. Heck, dessen Aufgabengebiet in Forschung und Lehre neben der Physikalischen Geodäsie und Satellitengeodäsie sowie der Geodynamik nach dem Ausscheiden von Prof. Schmitt auch die Mathematische Geodäsie umfasste, in den Ruhestand. Aufgrund von Verzögerungen im Berufungsverfahren konnte die Professur erst zum 01.10.2018 wiederbesetzt werden. Nachfolger auf dem Lehrstuhl mit der geänderten Widmung "Geodätische Erdsystemwissenschaft" ist Prof. Hansjörg Kutterer, der zuvor als Präsident des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG, Frankfurt/Main) tätig war.

3 Ziele, Forschung und Lehre an den Lehrstühlen

3.1 Lehrstuhl für Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie (1988 - 2010)

Günter Schmitt

3.1.1 Ziele

Nach dem Ausscheiden von Prof. Draheim im Jahre 1988 wurde sein Lehrstuhl von Geodäsie II in Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie umgewidmet. Dabei blieben die wesentlichen Ausbildungs- und Forschungsschwerpunkte Statistik und Ausgleichsrechnung sowie Landesvermessung im Kern erhalten. Hinzu kamen aktuelle Aspekte aus den neuen Forschungsaktivitäten, die konsequenterweise auch zu neuen Lehrangeboten insbesondere im Vertiefungsbereich führten.

3.1.2 Forschung

In dieser Periode wurden zunächst die Arbeiten zum optimalen Entwurf geodätischer Netze – der Netzoptimierung – zu einem gewissen Abschluss gebracht, insbesondere zur spektralen Optimierung. Wie bei allen Forschungsaktivitäten am Lehrstuhl stand die Weiterentwicklung der Theorie in engem Zusammenhang mit der Entwicklung geeigneter Software und der Anwendung auf reale Projekte.

Die meisten Arbeiten kann man unter der Überschrift rezente Krustenbewegungen sehen. Auch hier war immer die enge Verbindung zwischen theoretischen Arbeiten, zum Beispiel zur Weiterentwicklung der Ansätze zur Deformationsanalyse, der Softwareentwicklung und aktuellen Projekten gegeben, meistens in internationale Kooperationen und Großforschungsprojekte eingebettet. Ein Beispiel ist die Zusammenarbeit mit dem rumänischen Institut für hydroenergetische Studien und Projekte in der Vrancea Region in den Südostkarpaten, wo vor dem Hintergrund des Baus zweier Staudämme mit einer gemeinsamen Energiezentrale ein lokales Deformationsnetz angelegt und über einige Jahre hinweg beobachtet wurde, anfangs mit terrestrischen, später mit GPS-Beobachtungsverfahren. Ein weiteres Großprojekt war die 3D-Plattenkinematik in Rumänien als Teilprojekt im Sonderforschungsbereich 461 *Starkbeben: von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen*. Hier wurde ein ganz Rumänien überdeckendes GPS-Netz angelegt und über ein Jahrzehnt hinweg beobachtet, um zur geophysikalischen Erklärung der Beben in der Vrancea Region beizutragen.

Ein weiteres Projekt stellte die Echtzeitüberwachung eines indonesischen Vulkans auf zu erkennende Ausbrüche mit GPS-Messungen dar, eine Kooperation mit dem Institut für Technologie in Bandung, Java, der Universität New-South-Wales in Sydney, Australien und dem Geoforschungszentrum in Potsdam. Hier bestand der Beitrag des Lehrstuhls aus der Bereitstellung eines speziellen Softwarepakets zur interaktiven Deformationsanalyse der am Vulkan durchgeführten GPS-Messungen. Ein letztes in diesen Bereich fallendes Projekt befasste sich mit der Kinematik einer Großhangbewegung in Vorarlberg, Österreich, im Rahmen eines DFG-Bündelantrags *Hydrologische Versagensrisiken von Großhangrutschungen*, wo spezielle Deformationsmessungen mit verschiedenen Techniken in einer touristisch relevanten Region durchgeführt wurden.

Ein Schwerpunkt der letzten Jahre war das vom BMBF geförderte Verbundprojekt *Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstgewässer und Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) in Gunung Kidul, Java/Indonesien*. Hintergrund dieses Projektes war, die Wasserversorgungssituation der Bevölkerung in dieser Region deutlich zu verbessern. Ein

entscheidendes Ziel war der energieautarke Antrieb der Förderpumpen durch das unterirdische Wasserkraftpotential, also ohne externe Energiezufuhr. Beitrag der Geodäsie war die Erstellung geometrischer Grundlagen, im Wesentlichen die Höhlenvermessung, die Einrichtung eines Geoinformationssystems vor allem für die Projektpartner sowie Spezialvermessungen wie zum Beispiel Deformationsmessungen im unterirdischen Maschinenraum. Durch die Realisierung dieses Projektes konnte die Wasserversorgung für etwa 100.000 Bewohner in der Region von 10 Liter pro Tag auf ca. 70 Liter gesteigert werden.

3.1.3 Lehre

Das Lehrangebot des Lehrstuhls für Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie umfasste als Basis Grundveranstaltungen zur Ausgleichsrechnung und Statistik I und II mit den bekannten Standardinhalten sowie zur Landesvermessung I und II mit den klassischen Aufgaben Bezugsflächen, Koordinatensysteme, Transformationen und Großausgleichungsprojekten.

Im Vertiefungsbereich des Diplomstudiengangs wurden Veranstaltungen angeboten, die im Wesentlichen aus den aktuellen Forschungsaktivitäten am Lehrstuhl resultierten. Dazu gehörten zum Beispiel Ausgleichsrechnung und Statistik III mit den zentralen Themen Parameter- und Varianzkomponentenschätzung, robuste Schätzer, Kalman-Filter und Bayes-Statistik sowie die Analyse und Planung Geodätischer Netze mit den Schwerpunkten freie Netzausgleichung, Modelle der Netzverdichtung, Genauigkeitsmaße in geodätischen Netzen und optimaler Entwurf geodätischer Netze. Die Veranstaltung Rechentechnische Probleme in der Geodäsie befasste sich zentral mit der Lösung von Normalgleichungen – direkte und iterative Verfahren, Submatrizenzerlegung und Sparse-Techniken – und aktuellen Entwicklungen in der Computer-Arithmetik. Die geodätische Netzoptimierung beinhaltete die Designs nullter, erster, zweiter und dritter Ordnung bis hin zur spektralen Optimierung und verallgemeinerte Inversen.

3.2 Lehrstuhl für Geoinformatik (seit Oktober 2010)

Martin Breunig

3.2.1 Ziele

Die Geoinformatik untersucht bzw. vermittelt am KIT in Forschung bzw. Lehre als Querschnittsfach im Bereich *Natürliche und gebaute Umwelt* Methoden zur Modellierung, Verwaltung

und Analyse raumbezogener Geodaten. Am Lehrstuhl für Geoinformatik werden insbesondere Methoden für das raum- und zeitbezogene Management von Geodaten erforscht und prototypisch implementiert. Es werden auch neue Forschungsgebiete der Geoinformatik wie Geosensornetzwerke, 3D/4D Geoinformationssysteme und die Verarbeitung von *Big Geospatial Data* untersucht. Enge Kooperationen existieren u. a. mit dem Lehrstuhl für Physikalische und Satellitengeodäsie, dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) sowie mit den Angewandten Geowissenschaften am KIT. Die Geoinformatik ist in hohem Maße dafür geeignet, in Verbundprojekten eine integrative Rolle einzunehmen.

3.2.2 Forschung

Der Lehrstuhl für Geoinformatik versteht sich als eine Weiterentwicklung des Lehrstuhls für Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie. Er besteht personell aus einer guten Mischung von Mitgliedern des bisherigen Lehrstuhls und neuen Kräften aus der Geoinformatik. Ein gutes Beispiel hierfür ist das oben genannte IWRM-Projekt (*Integriertes Wasserressourcen-Management*), das von Prof. Schmitt mit-initiiert und am Lehrstuhl für Geoinformatik (Dr. Rösch) zu Ende geführt wurde.

Die Forschung am Lehrstuhl für Geoinformatik reicht von der Grundlagenforschung bis zur anwendungsorientierten Forschung und umfasst derzeit mit dem Zentrum des Geodatenmanagements die folgenden Themen:

- Geoinformationssysteme (insbesondere 3D/4D GIS)
- Modellierung und Verwaltung von Geometrie und Topologie
- Big Geospatial Data
- Mobile GIS
- Ingenieurprojekte zur Überwachung von Bauwerken
- Mode Detection auf der Basis von GNSS-Tracks
- Statistische Verfahren in GIS
- Data Mining.

Die Grundlagenforschung im Bereich der 3D/4D Geoinformationssysteme befasst sich insbesondere mit der raum-zeitlichen Erweiterung von Datenmodellen und mehrdimensionalen Zugriffsstrukturen sowie der Datenintegration verschiedener räumlicher Repräsentationen für Anwendungen in der natürlichen und gebauten Umwelt. Außerdem gilt es allgemeine theoretische Ansätze zur Modellierung der Geometrie und Topologie in beliebig-dimensionalen

Räumen für Anwendungen in der natürlichen und gebauten Umwelt zu erforschen. Dies war und ist Gegenstand verschiedener DFG-Projekte, die in enger Kooperation mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung am KIT (Prof. Hinz und Dr. Bradley) durchgeführt werden.

Da die anfallenden Datenmengen immer stärker ansteigen, muss man sich verstärkt Gedanken über eine geeignete Verarbeitung dieser als *Big Geospatial Data* bezeichneten, sehr großen Datenmengen (Terrabytes und mehr) im Rahmen von Geodatenbank-Architekturen machen. Beispielsweise soll es künftig für Simulationen möglich sein, die Daten simultan zur Simulation bei jedem Durchlauf aus der Datenbank abzurufen und zu visualisieren bzw. zu analysieren statt erst im Nachhinein weiterzuverarbeiten.

Ein Teil der heute auftretenden großen Datenmengen wird durch stationäre oder mobile vernetzte Sensoren erhoben. Die Forschung am Lehrstuhl befasst sich u. a. mit der Fragestellung, wie die optimale Auslastung eines Geosensornetzes unter Berücksichtigung einer ausgeglichenen Auslastung der verschiedenen Knoten des Netzes erreicht werden kann. Außerdem wird untersucht, wie zeitabhängige geometrische und topologische Daten möglichst effizient verarbeitet und über Sensoren hinweg übertragen werden können.

Am Lehrstuhl für Geoinformatik wird ferner anwendungsbezogene Forschung im Bereich der Mobilien GIS betrieben. Hier geht es beispielsweise um einen standardisierten Workflow von der Datenerfassung auf dem mobilen Gerät bis hin zur Datenverwaltung und Datenanalyse in einem GIS auf der Server-Seite (siehe auch Beitrag „Innovationen am Geodätischen Institut“ in dieser Festschrift).

Außerdem werden am Lehrstuhl für Geoinformatik Ingenieurprojekte an verschiedenen Orten zur Optimierung, Ausgleichung und Analyse geodätischer Überwachungsnetze bearbeitet. Dabei wird das Institut im Auftrag der Industrie, der freien Wirtschaft oder der öffentlichen Hand immer dann tätig, wenn es sich um die Überwachung sicherheitstechnisch relevanter Anlagen handelt und/oder die Anforderungen an die zu erreichende Genauigkeit besonders hoch sind.

Ein Beispiel hierfür ist das Überwachungsnetz im Innenstadtbereich der Stadt Staufen, wo ausgelöst durch Bohrungen für Erdwärmesonden es zu Hebungen und horizontalen Verwerfungen kommt und dadurch Infrastruktur- und Gebäudeschäden im hohen zweistelligen Millionenbereich verursacht wurden (siehe Abb. 17). Bei solchen Projekten ist i. d. R. eine Genauigkeit von wenigen Millimetern oder bei etwas kleinräumigeren Objekten im Submillimeterbereich gefordert, um bereits kleine Deformationen statistisch signifikant nachweisen zu können.

Dies erfordert den Einsatz modernsten Instrumentariums sowie die Anwendung statistisch fundierter Auswerte- und Analysekonzepte, deren Umsetzung in praktikable Softwarepakete vorwiegend am Geodätischen Institut selbst erfolgte.

Im Kontext der Ingenieurprojekte sind auch die Forschungsaktivitäten in Gunung Kidul, Java/Indonesien zu nennen. Hier unterstützt das Geodätische Institut die Kollegen aus dem Bauingenieurwesen bei der Überwachung einer unterirdischen Stauanlage. Die Anlage – es geht dabei vor allem um eine so genannte Maschinenplattform bestehend aus Pumpen bzw. Turbinen – ist die erste ihrer Art und stellt damit alle Beteiligten vor besondere Herausforderungen. Vom GIK wurde die Anlage bislang über mehr als 10 Jahre geodätisch überwacht, und es konnten trotz hochgenauer Messungen mit Genauigkeiten im mm-Bereich noch keine Deformationen nachgewiesen werden.

Weitere Forschungsarbeiten ergaben sich durch die Zusammenarbeit mit Softwareunternehmen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Analyse von Verkehrsdaten zu nennen, die gleich bei zwei unterschiedlichen Unternehmen zum Gegenstand der Kooperation wurden. Das GIK profitiert dabei durch die Praxisnähe nicht zuletzt auch zum Vorteil der Studierenden, während die Unternehmen den Einsatz neuester Methoden bei der Bearbeitung der anfallenden Fragestellungen zu schätzen wissen.



Abb. 17: Gebäudeschäden in Staufen (Quelle: tv Südbaden, 22.03.2012).

3.2.3 Lehre

Am Geodätischen Institut wird ein breit gefächertes Lehrangebot für die Studiengänge der *Geodäsie und Geoinformatik* sowie für andere Fächer der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus werden im Bereich *Natürliche und gebaute Umwelt* Export-Lehrveranstaltungen für die Architektur-Fakultät angeboten. An den Lehrveranstaltungen nehmen auch Studierende des Bauingenieurwesens, der Geoökologie, den Angewandten Geowissenschaften, der Geophysik, der Regionalwissenschaft/Raumplanung und der Meteorologie teil. Das aktuelle Lehrangebot des Lehrstuhls für Geoinformatik umfasst Lehrveranstaltungen im Bachelor- und Master-Studiengang *Geodäsie und Geoinformatik* wie beispielsweise Geoinformatik I und II, Programmieren für Geodäten I und II, CAD, Kartenprojektionen, Veranstaltungen der Ausgleichsrechnung und Statistik, die Analyse und Planung geodätischer Netze, Aufbaufächer Geoinformatik A und B, GIS-Analysen, Geodatenbanken, 3D/4D GIS, Projekt Geoinformatik, Mobile GIS, Objekt-orientierte Modellierung in GIS, 3D-Tools für geowissenschaftliche Anwendungen, sowie Geosensornetworks/Sensor DB.

3.3 Lehrstuhl Physikalische und Satellitengeodäsie (1991 - 2018)

Bernhard Heck

3.3.1 Ziele

Die Aufgaben des Lehrstuhls für Physikalische und Satellitengeodäsie orientieren sich im Wesentlichen am modernen Begriff der "Erdmessung" (im Sinne des englischen "Geodesy"), wie dieser von der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) definiert wurde. Das primäre Ziel der Erdmessung ist das Monitoring von geophysikalisch und anthropogen induzierten Prozessen im System Erde auf einem breiten Skalenbereich in Raum und Zeit.

Die Erdmessung als Teilgebiet der Geodäsie weist eine starke Affinität zu den Geowissenschaften auf und gründet auf den drei Pfeilern "Referenzsysteme", "Schwerefeld" sowie "Erdrotation und Geodynamik". Zu allen drei Teilbereichen leistet der Lehrstuhl für Physikalische und Satellitengeodäsie am GIK Beiträge in Forschung und Lehre. Während in früheren Perioden diese Aufgaben mit Hilfe terrestrischer Messungen bearbeitet wurden, nutzt man heute und künftig in immer stärkerem Maße Satellitenverfahren, die eine großräumige bzw. globale Datenabdeckung gewährleisten. Durch zyklische Abtastung der Erde mit satellitengestützten Verfahren können zeitliche Veränderungen in der Geometrie der Erdoberfläche sowie im

Schwerefeld der Erde nachgewiesen, quantifiziert und mittels geodynamischer Modelle mit gewissen Phänomenen und Prozessen verknüpft werden. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang Untersuchungen zum Globalen Wandel, die letztlich zum Verständnis der zugrundeliegenden natürlichen oder anthropogenen Prozesse beitragen und Prognosen für die Zukunft erlauben. Auf Grund der Komplexität dieser Prozesse sind internationale und interdisziplinäre Zusammenarbeit im Verbund der Geowissenschaften unumgänglich, mittlerweile aber auch selbstverständlich.

Mit der Wiederbesetzung der Professur im Oktober 2018 ist mit der neuen Widmung "Geodätische Erdsystemwissenschaft" auch eine Neuausrichtung des Lehr- und Forschungsgebiets verbunden, das geodätische Untersuchungen zur Geosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre sowie deren Wechselwirkungen umfasst, womit die Fokussierung auf geowissenschaftliche Themen noch stärker betont wird.

3.3.2 Forschung

Ein besonderer Schwerpunkt der Forschung zur Bestimmung und Beschreibung des Schwerefeldes der Erde waren in den ersten ca. 20 Jahren des Berichtszeitraums Arbeiten zu verbesserten Lösungen des Geodätischen Randwertproblems. Da das Geodätische Randwertproblem in der Formulierung nach Molodensky wegen der Komplexität der Randfläche – der Erdoberfläche – keine geschlossene analytische Lösung zulässt, werden bei der praktischen Berechnung des Quasigeoids verschiedene Approximationen eingeführt. Mit den international beachteten Arbeiten am Lehrstuhl konnten die durch Linearisierung, sphärische und planare Approximation entstehenden Approximationsfehler untersucht und numerisch abgeschätzt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden heute bei den von verschiedenen Institutionen durchgeführten Berechnungen hochgenauer Quasigeoidhöhen berücksichtigt. Während in den 1940er Jahren, als Molodensky seine Theorie aufstellte, ellipsoidische Höhen nicht messbar waren und die Form der Randfläche als unbekannte Funktion mitbestimmt werden musste, ist unter den heutigen Gegebenheiten der GNSS-Positionsbestimmung das Geodätische Randwertproblem als sog. Fixes Randwertproblem zu formulieren. Da auch dieses nicht exakt analytisch gelöst werden kann, wurden auch für diese Variante des Geodätischen Randwertproblems die jeweiligen Approximationsfehler untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden auf internationalen Kongressen (insbesondere Tagungen der IAG) sowie in internationalen Zeitschriften publiziert und fließen in eine praktische Berechnung des Quasigeoids von Baden-Württemberg ein, die in Kooperation mit dem LGL durchgeführt wird.

Ein zweiter Schwerpunkt war und ist bis heute der Modellierung der Wirkungen topographischer Massen und isostatischer Kompensationsmassen auf das Schwerefeld der Erde gewidmet. Topographische und isostatische Reduktionen sind im Zusammenhang mit der hochgenauen Geoid- und Quasigeoidbestimmung zu berücksichtigen, was bei traditionellen Verfahren zu einem sehr hohen Rechenaufwand führt. Die am Lehrstuhl begründete und fortentwickelte sog. Tesseroidmethode wurde international mit großem Interesse aufgenommen und wird inzwischen von vielen Arbeitsgruppen als Standard eingesetzt.

Die Vereinigung von Landeshöhensystemen und die Schaffung eines einheitlichen vertikalen Höhenreferenzsystems steht seit einigen Jahren im Fokus der Arbeiten der IAG. Ein einheitliches, globales, hochgenaues Höhensystem ist zwingend erforderlich, um z. B. die durch den globalen Wandel verursachten Bewegungen des Meeresspiegels erfassen und quantifizieren zu können. Diese Aufgabe führt methodisch zu einer Erweiterung des Geodätischen Randwertproblems, zu der am Lehrstuhl ebenfalls analytische und numerische Studien betrieben wurden.

In einem zweiten Themenkomplex zur geodätischen Nutzung von Satellitennavigationssystemen (GNSS: Global Navigation Satellite System) stehen die Verringerung von Fehlereinflüssen und die Verbesserung der Auswertemethodik im Vordergrund. Positionsfehler, die durch Mehrwegeeffekte und Ungenauigkeiten in der Antennenkalibrierung entstehen, sind wegen der sich wiederholenden Konfiguration der GNSS-Satellitenpositionen quasi-periodischen Effekten unterworfen; durch eine Nachbehandlung der Auswertergebnisse durch Mittelbildung der Residuen über mehrere Tage lassen sich signifikante Verbesserungen erzielen. Darüber hinaus konnte das stochastische Modell bei der Auswertung von GNSS-Phasenmessungen durch Verwendung des Signal-Rausch-Verhältnisses und Modellierung physikalischer Korrelationen verbessert und realitätsnäher gestaltet werden.

Ein weiterer Fehlereinfluss ist durch eine ungenaue Modellierung der Atmosphäre, insbesondere der Troposphäre, gegeben, wobei die meteorologischen Parameter Temperatur, Luftdruck und Wasserdampfgehalt eine besondere Rolle spielen. Mit Hilfe der wissenschaftlichen Berner GNSS-Software wurde die Auswirkung unterschiedlicher in der Literatur vorgeschlagener atmosphärischer Modelle am Beispiel von Beobachtungsstationen unter verschiedenen geographischen Gegebenheiten untersucht. Auf der Grundlage dieser Studien konnten für die Praxis Vorschläge und Empfehlungen für eine verbesserte Auswertemethodik gegeben werden. Derzeit werden diese Untersuchungen in dem von der DFG geförderten Verbundprojekt (zusammen mit weiteren Instituten des KIT und der ETH Zürich) AtmoWater weitergeführt mit dem Ziel, die raum-zeitliche Struktur der atmosphärischen Wasserdampfverteilung aus

der kombinierten Analyse von GNSS- und InSAR-Daten sowie meteorologischen Modellen genauer zu beschreiben. Die erwarteten Ergebnisse dieser Arbeiten sollen sowohl für die genauere atmosphärische Reduktion der geodätischen Beobachtungen als auch für die Assimilierung in meteorologische Modelle zur Wettervorhersage, insbesondere des Niederschlags, nutzbar sein.

Datensätze für umfangreiche Untersuchungen dieser Art wurden zunächst im Rahmen verschiedener GPS-Kampagnen auf der Antarktischen Halbinsel gewonnen, die Ende der 1990er Jahre teilweise in Verbundprojekten deutscher Universitäten und Forschungsinstitute, teilweise in alleiniger Verantwortung des Lehrstuhls durchgeführt wurden. Das Ziel dieser Kampagnen war primär die Ermittlung tektonischer Plattenbewegungen im Südatlantik. Weitere GPS-Messkampagnen wurden im Zusammenhang mit dem interdisziplinären und internationalen Verbundprojekt URGENT (Upper Rhine Graben Evolution and NeoTectonics) der EUCOR-Universitäten Basel, Freiburg, Strasbourg und Karlsruhe und deren Partnerinstituten Anfang des neuen Jahrtausends durchgeführt; die geodätischen Arbeiten zur Erfassung tektonischer Bewegungen im tri-nationalen Bereich des Oberrheingrabens können gewissermaßen als Fortsetzung der früheren Arbeiten im Testnetz Karlsruhe angesehen werden.

Episodische Kampagnenmessungen führen allerdings auch unter Beachtung aller Maßnahmen zu systematischen Abweichungen in den Positionen und anderer abgeleiteter Parameter. Nachdem seit dem Jahr 2000 in Deutschland und Europa immer mehr GNSS-Permanentstationen eingerichtet wurden, konnte dieses Potenzial auch für geodynamische Zwecke genutzt werden. Durch eine Kooperation mit EOST (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université de Strasbourg), den Landesvermessungsämtern von Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und des Saarlandes sowie der Landesvermessung der Schweiz (swisstopo) werden die Beobachtungsdaten aller Permanentstationen im Bereich des Oberrheingrabens seit 2002 im Projekt GURN (GNSS Upper Rhine Graben Network) systematisch gesammelt und analysiert, um aus den Zeitreihen der täglichen Positionen periodische und säkulare Bewegungen abzuleiten.

Während mit GNSS punktweise Verschiebungen der Erdoberfläche mit hoher zeitlicher Auflösung ermittelt werden können, erlauben Radar-Aufnahmen der Erdoberfläche mittels SAR-Satelliten eine flächenhafte Bestimmung, allerdings mit einer zeitlichen Auflösung von mehreren Tagen bis Wochen. Seit ca. 2008 werden am Lehrstuhl methodische und numerische Untersuchungen zum interferometrischen SAR-Verfahren (InSAR) durchgeführt, wobei die auf größeren Stapeln von SAR-Aufnahmen beruhende Persistent-Scatterer-Methode (PS) sehr hohe Genauigkeiten für die abgeleiteten Verschiebungen permanent rückstreuender Bo-

denpixel liefert. Mit einem innovativen Berechnungsverfahren konnten die in Folge einer fehlerhaften Erdsondenbohrung entstandenen Bodenhebungen in der Stadt Staufen ermittelt und die mit PS-InSAR gewonnenen Resultate den Ergebnissen von wiederholten Nivellements gegenübergestellt werden. Die hierbei verwendeten Messungen der deutschen Satellitenmission TerraSAR-X erlaubten nicht nur die Bestimmung der Bewegungen einer großen Anzahl von Bodenpixeln im Stadtgebiet mit hoher Genauigkeit, sondern lieferten auch Informationen zur thermischen Ausdehnung von Gebäuden und zu Neigungen von Fassaden mehrstöckiger Häuser.

Die im Datenarchiv der ESA vorhandenen SAR-Messungen der Satelliten ERS-1/2 und Envisat im C-Band bilden eine hervorragende Grundlage für die großflächige Bestimmung von Bodenbewegungen. Die Datensätze von auf- und absteigenden Bahnbögen dieser Satellitenmissionen wurden – ebenfalls auf der Basis der PS-InSAR-Methode – für das Gebiet des Oberrheingrabens analysiert und mit den auf einen Zeitraum von ca. 100 Jahren bezogenen Ergebnissen von wiederholten Präzisionsnivellements sowie den aus dem GURN-Projekt vorliegenden Punktgeschwindigkeiten aus GNSS-Messungen kombiniert. Das entwickelte Kombinationsverfahren nutzt die Vorteile der verschiedenen geodätischen Messverfahren aus (GNSS punktweise mit hoher zeitlicher Auflösung; InSAR mit hoher räumlicher, aber geringerer zeitlicher Auflösung; Nivellements mit linienweiser Datenverteilung über eine lange Zeitbasis) und führt zur optimalen Schätzung der raum-zeitlichen Struktur der Bodenbewegungen. Als Ergebnis resultiert eine Karte der horizontalen und vertikalen Bewegungen der Erdoberfläche im Bereich des Oberrheingrabens, die nunmehr den Kollegen aus den Geowissenschaften reichlich Gelegenheit zur Interpretation und zur Überprüfung ihrer geodynamischen Modellvorstellungen gibt. Dieses Projekt wird unter Verwendung der neuen GNSS-Datensätze der letzten Jahre und der Messdaten der aktuellen Sentinel-Missionen der ESA fortgeführt, um die Genauigkeit noch weiter zu steigern.

SAR-Daten der deutschen Mission TanDEM-X, die aus zwei in einer Helix-Formation fliegenden Satelliten besteht, wurden im Rahmen eines vom BMWi geförderten Forschungsprojekts benutzt, um Deformationen von dombildenden Vulkanen sowie Lavaflüsse bei Vulkanausbrüchen aus Zeitreihen von digitalen Geländemodellen (DGM) zu bestimmen. Im Gegensatz zu klassischen monostatischen Aufnahmen kann mit den bistatischen TanDEM-X-Aufnahmen bereits aus einem Überflug des Satellitenpaares ein DGM berechnet werden, sodass Änderungen der Rückstreu- und atmosphärischen Bedingungen zwischen den Aufnahmen keine Rolle spielen. Aus den Zeitreihen differentieller digitaler Höhenmodelle konnten auf Basis der im Rahmen des Projekts entwickelten Methodik magmatische Förderraten, Materialflüsse und Volumenänderungen abgeleitet und deren Genauigkeit im Detail analysiert werden.

Weitere Forschungsarbeiten wurden zusammen mit internationalen Gästen und Stipendiaten am GIK sowie innerhalb internationaler Forschungsprojekte mit Kollegen von ausländischen Universitäten durchgeführt. Nachdem zunächst im Rahmen eines UNIBRAL-Projekts mit Austausch von Studierenden zwischen dem Studiengang Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Karlsruhe und der Universidade Federal do Paraná (UFPR) in Curitiba/Brasilien die Kontakte mit den brasilianischen Kollegen hergestellt worden waren, nahmen Doktoranden und Dozenten von beiden Seiten an dem 2006 - 2012 von DAAD und CAPES finanzierten PROBRAL-Austauschprogramm "Highly Precise Positioning and Height Determination Using GPS" teil. Unter gemeinsamer Betreuung von Prof. Heck und den brasilianischen Kollegen Prof. Claudia Krueger und Prof. Silvio Freitas entstanden fünf Dissertationen von brasilianischen Doktoranden in den Themenbereichen "GNSS-Positionsbestimmung" und "Schwerefeld und Höhensysteme". Insbesondere wurde in diesem PROBRAL-Projekt die erste brasilianische Kalibrierstation für GNSS-Antennen an der UFPR eingerichtet und die Qualität des brasilianischen Höhennetzes analysiert. Weitere wissenschaftliche Kontakte zu südamerikanischen Universitäten bestehen mit der Universidad de Concepcion in Chile in den Arbeitsbereichen GNSS-Positionsbestimmung (Prof. Juan Baez) und InSAR (Prof. Guido Staub).

Die bereits in den 1970er Jahren begründete Kooperation mit dem Lehrstuhl für Höhere Geodäsie an der TWU Budapest/Ungarn (Prof. Peter Biro, Prof. Jozsef Adam, Prof. Szabolcs Rozsa, Prof. Akos Detreköi) wurde durch verschiedene vom DAAD finanziell unterstützte Projekte weiter vertieft. Wegen seiner Verdienste um die Zusammenarbeit der beiden Universitäten wurde Prof. Heck 2006 mit der Ehrendoktorwürde der TWU Budapest ausgezeichnet und 2013 als Ehrenmitglied in die Ungarische Akademie der Wissenschaften aufgenommen. Das bereits oben erwähnte, laufende Projekt GURN beruht auf einer engen Kooperation mit Prof. Frédéric Masson von der Université de Strasbourg/Frankreich.

Die Bestimmung eines genauen Geoids als Höhenreferenzfläche für den Bereich des afrikanischen Kontinents ist das Ziel eines laufenden Forschungsprojekts mit Prof. Hussein Abd-Elmotaal von der Minia University in Ägypten. Neben dem Produkt "Afrikanisches Geoid" stehen auch methodische Untersuchungen – z. B. Vergleiche zwischen verschiedenen Auswerteverfahren – im Zentrum der Arbeiten in dem u. a. von DAAD und IAG unterstützten Projekt. Auch mit der Curtin University in Perth/Australien unterhält der Lehrstuhl eine langjährige Zusammenarbeit, insbesondere mit Prof. Joseph Awange im Rahmen seines Alexander-von-Humboldt-Forschungsstipendiums; die gemeinsamen Arbeiten sind vor allem auf Anwendungen der Geodäsie im Bereich der Meteorologie und Hydrologie ausgerichtet. Relativ neu ist die Kooperation mit der Hohai University in Nanjing/China (Prof. Vagner

Ferreira), ebenfalls zu umweltrelevanten Themen, wodurch mit Asien die Liste der Kontinente auf der Erde (abgesehen von der Antarktis) hinsichtlich der internationalen Forschungsvorhaben des Lehrstuhls vervollständigt wird.

3.3.3 Lehre

Der vom Lehrstuhl betreute Bereich der akademischen Lehre besteht aus einem breiten Spektrum, das an allen anderen deutschen Universitäten von mindestens zwei Professuren abgedeckt wird. Die Lehrveranstaltungen zum Fachgebiet "Mathematische Geodäsie" im BSc-Studiengang "Geodäsie und Geoinformatik" umfassen die Vorlesungen und Übungen "Geometrische Modelle der Geodäsie" und "Geodätische Flächenkoordinaten". Im Themenbereich Satellitengeodäsie werden neben GNSS-orientierten Inhalten (Einführung in GNSS, GNSS-Praktikum) auch die Bahndynamik und weitere geodätische Raumverfahren behandelt. Ebenfalls im BSc-Studiengang sind die der Physikalischen Geodäsie zugehörigen Pflichtfächer "Figur und Schwerefeld der Erde" inklusive "Gravimetrie" sowie "Kinematik und Dynamik geodätischer Referenzsysteme" eingegliedert.

Im MSc-Studiengang werden diese Themen weiter vertieft und durch Lehrveranstaltungen zur regionalen und globalen Schwerefeldbestimmung, zur wissenschaftlichen Nutzung von GNSS, zur Geodätischen Astronomie, zu Grundlagen und geodätischen Anwendungen von InSAR, zur Rezenten Geodynamik sowie durch eine englischsprachige Vorlesung "Geodetic Reference Frames and Systems" ergänzt.

Als Besonderheit in Karlsruhe ist die enge Verbindung zwischen Geodäsie und Geophysik zu nennen. Bereits seit den 1980er Jahren beteiligt sich das GIK mit einem Gravimetrie-Experiment an den Geophysikalischen Labor- und Feldpraktika des Geophysikalischen Instituts. Seit mehreren Jahrzehnten können die Geophysik-Studierenden im BSc-Studium das Wahlfach "Geodäsie" belegen, was in den letzten Jahren den Weg zu einem parallelen Studium beider Studienfächer mit doppeltem MSc-Abschluss vorbereitet hat, den mehrere Studierende aus beiden Studienfächern erfolgreich beschrritten haben. Weitere Teilnehmer am Lehrprogramm des Lehrstuhls sind immer wieder auch Studierende der Fächer "Elektrotechnik und Informationstechnik" (Studienmodell Ausrüstungssysteme der Luft- und Raumfahrt) und "Physik". Ein Lehrexport fand bzw. findet ebenfalls in die internationalen Studiengänge "Resources Engineering", "Water Science and Engineering" sowie "Remote Sensing and Geoinformatics" der Fakultät Bau-Geo-Umwelt statt.

3.4 Lehrstuhl Geodätische Erdsystemwissenschaft (seit Oktober 2018)

Hansjörg Kutterer

3.4.1 Ziele

Mit der Umwidmung des Lehrstuhls "Physikalische und Satellitengeodäsie" in "Geodätische Erdsystemwissenschaft" ergibt sich sowohl eine inhaltliche als auch eine methodische Weiterentwicklung der Aktivitäten. Inhaltlich geht es bei der geodätischen Erdsystemwissenschaft um die Quantifizierung von Veränderungen im System Erde, auch im Zuge des Global Change, mit geodätischen Methoden und deren Interpretation im interdisziplinären Zusammenspiel. Wesentliches Merkmal ist dabei die geodätische Erfassung von Prozessen und deren Wechselwirkungen in Subsystemen wie Geosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre. Neben den wissenschaftlich-technologischen Herausforderungen besitzt diese Aufgabengstellung einen engen Bezug zu Politik und Gesellschaft. Sie erfordert gleichermaßen eine eingehende, grundlagenorientierte Weiterentwicklung von Modellen und Methoden und eine enge Kooperation mit benachbarten Disziplinen in konkreten Anwendungsprojekten sowie die gezielte Einbindung verantwortlicher Einrichtungen, insbesondere aus der öffentlichen Verwaltung.

Der innovative Schwerpunkt der geplanten Arbeiten der Professur am KIT in Forschung und Lehre soll auf einem durchgängig integrierten, interdisziplinär angelegten Ansatz liegen, der auf einem realistischen Unsicherheitshaushalt basiert und bei dem die gesamte Prozesskette berücksichtigt wird. Integration bedeutet dabei zum einen die konsistente Kombination von zueinander komplementären geodätischen und weiteren Beobachtungsverfahren sowie die Einbeziehung innovativer Technologien wie optische Uhren. Zum anderen ist die gemeinsame Modellierung der bislang eher getrennt behandelten drei Säulen der Geodäsie (Referenzsysteme, Schwerefeld und Erdrotation) unter Verwendung numerischer geowissenschaftlicher Modelle gemeint, zum Beispiel zu Massentransporten im System Erde. Die wissenschaftlichen Arbeiten und die forschungsorientierte akademische Lehre sollen entlang der drei Hauptlinien Erdsystembeobachtung, Erdsystemmodellierung und Erdsystemanalyse angelegt werden.

Eine besondere Bedeutung für die Erdsystemwissenschaft haben moderne Forschungsinfrastrukturen. Das geodätisch-geophysikalische Gemeinschaftsobservatorium BFO in Schiltach, das von der Professur geleitet und gemeinsam von KIT und Universität Stuttgart getragen wird, soll entsprechend weiterentwickelt werden. Auch sollen geodätische Observatorien sowie

Infrastrukturen der satellitengestützten Positionsbestimmung und der Satellitenfernerkundung verstärkt berücksichtigt werden.

3.4.2 Forschung

Die grundlegende geodätische Fragestellung der Bestimmung der Figur der Erde hat sich in den vergangenen Jahrzehnten, unterstützt durch die revolutionären Entwicklungen z. B. im Bereich der Satelliten-, der Laser- sowie der Informations- und Kommunikationstechnologien, stark weiterentwickelt. Die terrestrischen Verfahren und die Weltraumverfahren der Geodäsie wie z. B. die Nutzung der Globalen Navigationssatellitensysteme oder die Schwerefeldsatellitenmissionen wie GRACE oder GRACE-FO haben bereits heute einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Mit Relevanz für die Professur hinzugekommen ist in den vergangenen Jahren die satellitengestützte oder terrestrisch betriebene Persistent-Scatterer-Radarinterferometrie (PS-InSAR). So werden je nach Verfahren punktuelle oder flächenhafte, in der Regel zeitvariable Beobachtungsgrößen erhalten. Weitere innovative, geodätisch nutzbare Technologien sind absehbar, z. B. auf Basis von Quantentechnologien. Insbesondere werden optische Uhren in der Lage sein, Schwerepotentialdifferenzen hochgenau auszumessen und damit zu einer global konsistenten Höhenbestimmung beizutragen.

Der Zugang zur Forschung in der geodätischen Erdsystemwissenschaft soll im Rahmen der Professur drei Perspektiven berücksichtigen:

- (1) Betrachtung als unmittelbarer wissenschaftlicher Gegenstand,
- (2) Betrachtung als auf wissenschaftlichen Methoden aufgebaute Prozesskette und
- (3) Betrachtung als Beitrag zu aktuellen gesellschaftlichen Themen.

Hinter allen drei Perspektiven steht die Tatsache, dass bereits heute viele geodätische Beobachtungen aufgrund nachhaltig betriebener Infrastrukturen wie GNSS (Globale Navigationssatellitensysteme wie GPS oder GALILEO) oder COPERNICUS (Europäisches Fernerkundungssatellitensystem) kontinuierlich und frei verfügbar sind. Somit werden für wissenschaftliche und weitere Aufgaben heterogene, geowissenschaftlich relevante Daten in großer Menge und in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erhalten, die vielfältig miteinander kombinierbar sind, sodass signifikante Mehrwerte für die Erdsystemwissenschaft und darüber hinaus erschlossen werden können.

Die Erdsystemwissenschaft steht heute erst am Anfang. Das mit den aktuellen und absehbaren Gegebenheiten verbundene Potenzial wird bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Über ihre unmittelbare geodätische Bedeutung der räumlichen und zeitlichen Referenzierung von

Objekten und Prozessen im System Erde hinaus bieten geodätische Beobachtungen vor allem auch einen direkten Zugang zu weiteren Parametern von Prozessen im System Erde. Damit liefern geodätische Beobachtungen Beiträge zu einer Vielzahl an wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen.

Zu (1): Forschungsgegenstand "Geodätische Erdsystemmodellierung"

Gezielt erhobene, für wissenschaftliche Arbeiten zugängliche Datensätze für die Erfassung und Detektion von Veränderungen der Erdoberfläche bieten vielfältige Ansatzpunkte für Forschung im Bereich der geodätischen Erdsystemwissenschaft und ein gutes Potenzial für interdisziplinäre Kooperationsprojekte. Beispiele sind die vielfältigen Produkte der wissenschaftlichen Dienste der International Association of Geodesy (IAG).

Zu (2): Forschungsgegenstand "Integrierte geodätische Beobachtungssysteme"

Die übergreifende Befassung mit integrierten Beobachtungskonfigurationen und deren Optimierung, auch auf Basis von umfassenden, möglichst interaktiv angelegten Simulationsstudien, wird ein zentrales Thema der Arbeiten in der Professur sein. Von besonderem Interesse ist dabei die Weiterentwicklung der Arbeiten zur Verknüpfung von klassischen geodätischen Verfahren mit der Radarinterferometrie. Zudem bietet die Einbeziehung von geowissenschaftlichen Observatorien wie dem BFO oder dem Geodätischen Observatorium Wettzell aussichtsreiche Ansatzpunkte.

Zu (3): Forschungskontext "Globale Initiativen im Kontext des globalen Wandels"

In Verbindung mit dem globalen Wandel und seinen unterschiedlichen Facetten gibt es drängende gesellschaftliche Fragestellungen. Auf internationaler Ebene widmet sich z. B. die Group on Earth Observations (GEO) diesem Thema mit dem Aufbau und der Weiterentwicklung des sogenannten Global Earth Observing System of Systems (GEOSS). Die IAG trägt mit dem Global Geodetic Observing System (GGOS) zum GEOSS bei. Zentrales Anliegen von GEO sind Beiträge zu insgesamt acht sogenannten Societal Benefit Areas, zu denen z. B. die für die geodätischen Arbeiten bedeutsamen Bereiche "Disaster Resilience", "Energy and Mineral Resources Management" sowie "Water Resources Management" zählen. Derartige Entwicklungen werden eng begleitet, auch um die übergeordnete Relevanz der Arbeiten in der Professur sicherzustellen.

3.4.3 Lehre

Die akademische geodätische Lehre muss den angesprochenen wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen und den formulierten Ansprüchen im Hinblick auf integriertes und interdisziplinäres Arbeiten konzeptionell, inhaltlich und methodisch Rechnung tragen.

Der Berufsnachwuchs ist sowohl im Bachelor- als auch im Masterstudiengang durch forschungsorientierte Lehre entsprechend dem Selbstverständnis des KIT kompetenzorientiert so zu qualifizieren, dass er auf den Einstieg in den Beruf und auf das lebenslange Lernen hervorragend vorbereitet ist. Dabei sind sowohl die Grundlagen aus dem Lehrgebiet der Professur zu berücksichtigen, die für alle Studierenden erforderlich sind, als auch die Inhalte der Vertiefung, die für eine einschlägige berufliche Arbeit sowie für eine Promotion und eine mögliche wissenschaftliche Laufbahn qualifizieren sollen. Somit ist ein breites Grundlagenwissen zu vermitteln, welches exemplarisch zu vertiefen ist. Daraus ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Fachkompetenzen und die integrativen Schlüsselkompetenzen.

Die im Rahmen der Lehre zu erwerbenden Kompetenzen im Bereich der geodätischen Erdsystemwissenschaft werden in den verschiedenen Veranstaltungen mit zunehmendem Anspruch bereits heute gut vermittelt. Dies sind vor allem ein vertieftes Verständnis und ein sicherer Umgang mit dem Potenzial und den Beobachtungen der geometrischen und physikalischen Verfahren der Erdmessung und der Satellitengeodäsie bis hin zur Auswertung und Analyse der Ergebnisse aus geodätischer Sicht und deren Visualisierung. Daneben kommt die interdisziplinäre Zusammenarbeit im Hinblick auf eine fundierte geowissenschaftliche Interpretation der erhaltenen Signale von Prozessen im System Erde zu tragen. Die erforderliche Kompetenz wird im fachlichen Dialog gefördert.

Durch eigene praktische Erfahrung der Studierenden im Rahmen von Projektarbeiten – je nach Aufgabenstellung auch lehrstuhlübergreifend – wird das theoretische Wissen exemplarisch geübt und vertieft, um so auch die Anwendungskompetenz zu fördern. Hier ist, z. B. durch Veranstaltungen mit seminaristischem Charakter, auch der direkte Kontakt der Studierenden mit den Lehrenden gezielt herzustellen und zu verstärken, um die Fähigkeit zum fachlichen Dialog sowie zur kritischen Reflexion zu entwickeln und zu vertiefen.

3.5 Lehrstuhl Vermessungskunde und Geodätische Sensorik (seit November 2000)

Maria Hennes

3.5.1 Ziele

Der Lehrstuhl Vermessungskunde und Geodätische Sensorik widmet sich in Forschung und Lehre Kernfragen der Metrologie, die Galileo Galilei folgendermaßen beschrieb: „*Alles messen, was messbar ist – und messbar machen, was noch nicht messbar ist*“, ohne den aus dem Ingenieurwesen resultierenden Anspruch an Effizienz und Wirtschaftlichkeit aus den Augen zu verlieren. Dabei wird dem fest in der Geodäsie verankerten Erbe gefolgt, höchsten Qualitäts- und vor allem Genauigkeitsansprüchen zu genügen. Weil man sich am Rande der Gerade-noch-Messbarkeit bewegt, resultiert die Forschungsaufgabe, alle Störeinflüsse artgerecht zu modellieren. Damit geht die Entwicklung entsprechender Kalibrierbauten einher. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem raum-zeitlichen Messen im Nahbereich, vor allem in der Fertigungsmesstechnik bzw. Large Volume Metrology. Unser Ziel ist, die derzeit führende Position in der raum-zeitlichen, also kinematischen, Kalibrierung (im μm -, μs -Bereich) zu halten, um für Wissenschaft und Industrie die benötigten Verfahren bereitzustellen. Dabei kooperieren wir eng mit dem Maschinenbau, um den daraus resultierenden Ansprüchen gerecht werden zu können. Gleichfalls interdisziplinär erfolgt die Messbarmachung refraktiver Störgrößen insbesondere über die Theorie der optischen Turbulenz. Unser Leitsatz heißt somit in modifizierter Form: "*Alles effizient messen, was gerade noch messbar ist – und messbar machen, was noch nicht messbar ist.*"

3.5.2 Forschung

Die Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf die dimensionelle Metrologie im Nahbereich, vor allem zur Qualitätssicherung in der industriellen Fertigung. Denn im Hinblick auf immer enger werdende Toleranzen und fortschreitende individualisierte Fertigung reicht die bisher übliche stichprobenartige Kontrolle nicht aus. Außerdem wächst die Bedeutung der Erfassung der Verformung des Fertigers (Roboters) sowie des Werkstücks unter sich ändernden Last- bzw. Belastungszuständen während des Fertigungsprozesses. Eine besondere Herausforderung besteht im raumzeitlichen Abgleich, beispielsweise bei kooperierenden Robotern (vgl. Abb. 18), deren Bewegungen bis in den μm - bzw. μs -Bereich aufeinander abgestimmt sein müssen. Durch frühzeitiges Erkennen von Abweichungen und ihrer simultanen Korrektur

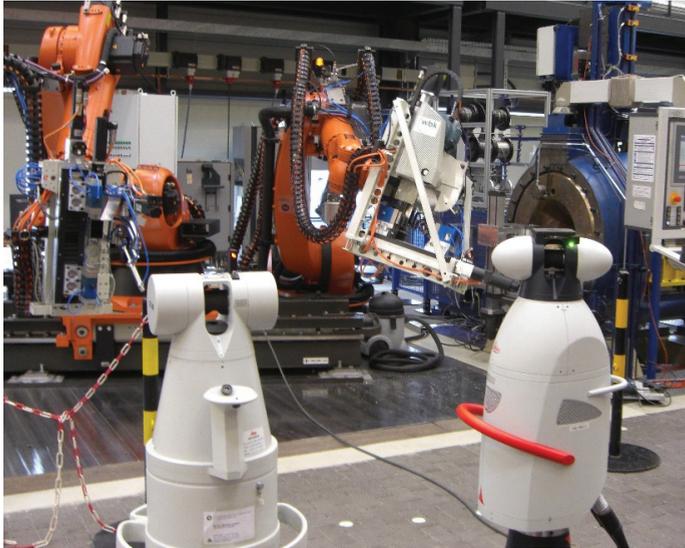


Abb. 18: Zwei Lasertracker bei der raum-zeitlichen Vermessung von kooperierenden Robotern (Kooperation mit dem Institut für Produktionstechnik wbk des KIT, Sonderforschungsbereich Transregio 10: Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung leichter Tragwerkstrukturen).

sollen die Qualitätsanforderungen effizient in der laufenden Produktion sichergestellt werden. Dies leistet im Ansatz die so genannte Large Volume Metrology (LVM), jedoch fehlen derzeit effiziente Methoden und unabhängig geprüfetes (insbesondere rückgeführtes) Instrumentarium. Daher erarbeiten wir neuartige Prüfprozesse und Fertigungsstrategien.

Prüfung und Kalibrierung von hochpräzisen dreidimensionalen Messmitteln ist daher ein zentrales Thema unserer Forschungsaktivitäten. Das am GIK entwickelte und implementierte Prüfinstrumentarium ergänzt durch die Möglichkeit, raumzeitliche Aspekte zu untersuchen und zu prüfen, dasjenige der nationalen Eichinstitute. Daher konzentrieren wir uns im Hinblick auf die zukünftig mehr und mehr nachgefragte Optimierung raum-zeitlicher Messprozesse auf die raum-zeitliche Kalibrierung von Präzisionsmessmitteln, die neben hohen geometrischen Anforderungen auch hohe Anforderungen an die Synchronisierung von Prüfling und Prüfmittel stellt. Mit diesem Alleinstellungsmerkmal bedienen wir sowohl die hochpräzisen Messmittel der LVM als auch das Angebot der klassischen geodätischen Instrumente, die für die Steuerung von Bau- und landwirtschaftlichen Maschinen inzwischen teilweise ebenfalls mit der Funktionalität des kinematischen Messens ausgestattet sind. Hierzu wurden diverse Prüfanlagen aufgebaut, wobei die an unserem Institut entwickelte hochpräzise Linearbahn STEVE (vgl. Abschnitt 3.2 im Beitrag „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen

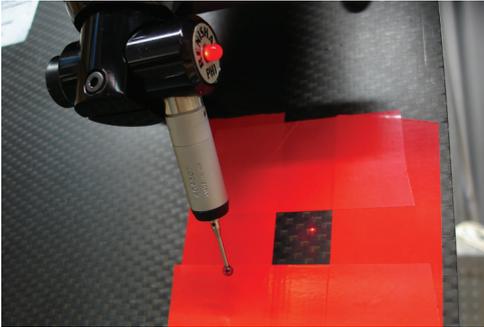


Abb. 19: Experiment zum Vergleich von antastenden und berührungslosen Messverfahren auf GFK.



Abb. 20: GIK-Messequipment zur Bestimmung des Normalkilometers an der Universität der Bundeswehr.

Institut im Kontext aktueller Herausforderungen“) hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit weltweit einzigartig ist, weil sie zeitreferenzierte Referenztrajektorien mit einer Unsicherheit von wenigen μm und wenigen μs erzeugt. Sie ist eine Nachfolgeentwicklung aufgrund der Erkenntnisse des besonderen Antriebssystems, das in der längeren Prüfeinrichtung PHIL (vgl. Abschnitt 3.3 im Beitrag „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“) realisiert ist. Auftragsentwicklungen von hochpräzisen rein geometrischen Präzisionslinearbahnen für andere Prüflaboratorien ergänzen das Spektrum.

Da eine durchgreifende Qualitätssicherung in kontinuierlichen Fertigungsprozessen auch eine simultane und kontinuierliche Überprüfung der Messmittel selbst erfordert, befassen wir uns mit Prüfprozessoptimierungen, insbesondere der Entwicklung von Simultan- und Selbstkalibrierungsprozessen mit dem Ziel, ohne Arbeitsunterbrechung die Funktionalität im Rahmen der Anforderung an diese Messmittel sicher zu stellen und Ausfallzeiten während des Fertigungsprozesses zu minimieren. Die Genauigkeitsanforderungen gehen bis in den μm -Bereich über Volumina von einigen Kubikmetern.

Ein weiteres Forschungsfeld bildet die optimale Objektantastung, die aufgrund des Antastoffsets und der materialabhängigen Eindringtiefe des Laserstrahls eine besondere Herausforderung darstellt. In diesem Zusammenhang wurden Untersuchungen auch in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) im Hinblick auf GFK¹ durchgeführt (vgl. Abb. 19).

Aktuell vermessen wir natürliche Oberflächen von Gesteinen, um Spaltquerschnitte und Rauigkeitsbeiwerte von Klüften für die Bewertung des Fluid-Transportvermögens geologischer

¹ GFK: Glasfaserverstärkter Kunststoff



Abb. 21: Referenzpunktbestimmung am RTW, rechts beim Anbringen der Zielmarken.

Formationen (z. B. für geothermische Anlagen, Erdöl) belastbar bestimmen zu können. Diese Untersuchung wird für das Institut für Angewandte Geowissenschaften des KIT durchgeführt.

Neben den in Bezug auf die zu erreichende Genauigkeit anspruchsvollen Aufgaben der LVM arbeiten wir an Methoden zur generellen Effizienzsteigerung von Messprozessen, wobei hinsichtlich Zeit- und Personalbedarf, erreichbarer Messunsicherheit, Robustheit des Prozesses und Belastbarkeit des Ergebnisses zu optimieren ist. Ein Beispiel ist die Optimierung der Bestimmung der so genannten "local ties" zur Verknüpfung unterschiedlicher geodätischer Raumverfahren: Hierbei wurde erfolgreich ein Verfahren entwickelt, das ohne Störung des VLBI-Teleskopbetriebs die Bestimmung des Teleskopreferenzpunktes erlaubt. Abb. 21 zeigt die Untersuchungen am RTW².

Die Belastbarkeit des Messergebnisses hängt von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der auftretenden Abweichungen ab und somit von der Faltung der Verteilungen der beeinflussenden Größen. Ein neuer Gedanke, statistische Vorinformationen über das Objektverhalten selbst, insbesondere über die Wahrscheinlichkeit seines zu erwartenden Bewegungsablaufs, in die Betrachtung einzubeziehen, wurde im Rahmen einer Dissertation untersucht. Mit den dort entwickelten Methoden können un stetige Bewegungsänderungen, die bei der Steuerung von Robotern und Werkzeugmaschinen üblich sind, artgerechter modelliert werden als mit den

² RTW: Radioteleskop Wettzell

bisher üblichen Kalmanfiltern. Damit ist ein erster Schritt zu Bayes-Statistik-gestützter Sensorfusion für das raum-zeitliche Bestimmen der Unsicherheit von Bahnkurven gelungen.

Ein wesentlicher Störeinfluss auf optische Messungen sind refraktive Effekte. Diese wirken sowohl auf Distanz- als auch auf Richtungsmessungen. Für letzteres wurde das in der Meteorologie entwickelte Turbulent Transfer Model, das anhand von Wärme- und Momentenfluss den Rückschluss auf den vertikalen Temperaturgradienten erlaubt, zum OTTM³ weiter entwickelt. Das OTTM erlaubt die Bestimmung des Gradienten unmittelbar aus der Varianz des (optischen) Bildrauschens, die ja quasi als Abfallprodukt bei jeder Messung bestimmbar ist. Zur Validierung der Ergebnisse wurde ein Temperatur(gradienten)messsystem entwickelt, das hohen Genauigkeitsforderungen genügen muss. Dieses konnte seine Leistungsfähigkeit beim Ringversuch der GKGM⁴ zur Bestimmung des "Normalkilometers" an der Universität der Bundeswehr (Abb. 20) unter Beweis stellen: im Vergleich zu den Ergebnissen der übrigen Ringversuchsteilnehmer unterschritten alle Messungen des GIK die maximale Abweichung von 30 µm in den Einzelstrecken in Bezug auf den Mittelwert der übrigen acht Teilnehmer, was ohne die Erfassung der integralen Temperatur auf mindestens 0,1 °C nicht möglich gewesen wäre. Mit den am GIK vorhandenen Videotachymetern höchster Genauigkeit soll die Implementierung des OTTM vorangetrieben werden.

In den nächsten Jahren sollen die folgenden vier Bereiche weiter verfolgt werden:

- (1) Raumzeitliche Metrologie
- (2) Entwicklung von Messmitteln: Sensorfusion (autonome Roboter), Adapter
- (3) Oberflächenvermessung: Feinstrukturen (Geothermie) und Verformungen (v. a. LVM)
- (4) Entwicklung von Kalibriereinrichtungen.

Die größten Potentiale und internen Synergien werden in der LVM gesehen: Die zukünftig verstärkt individualisierte Fertigung fordert vermehrt effiziente Prozesse und Methoden der Qualitätssicherung. Daher sollen die Aktivitäten in der LVM fortgesetzt werden (1&2), vor allem durch die Fortentwicklung von Methoden der Selbst- und Simultankalibrierung der Messmittel simultan zu ihrem Einsatz (1&2). Der im laufenden ZIM-Projekt⁵ entwickelte autonome Roboter soll für weitere Präzisionsanwendungen erweitert und mit weiteren Sensoren und Aktoren kombiniert werden (2). Die Kopplung dieses autonomen Roboters mit A-TOM⁶

³ OTTM: Optical Turbulent Transfer Model

⁴ GKGM: Gesellschaft zur Kalibrierung geodätischer Messmittel

⁵ ZIM: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand

⁶ A-TOM: Adapter für Trackingfähige Optische Messsysteme

soll eine noch flexiblere Erfassung von Oberflächen im dynamischen Modus erlauben (2&3). Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sollen, gekoppelt mit der Weiterentwicklung der Sensorfusion (2), die Steuerung von Bau- und landwirtschaftlichen Maschinen befähigen. Aufgrund der statistischen Komponente der Sensorfusion wird eine gute Anknüpfungsmöglichkeit an das Kompetenzfeld des designierten Leiters des Teilinstituts "Geodätische Erdsystemwissenschaft" gesehen (2).

Effiziente Verfahren zur Bestimmung von Rauigkeitsbeiwerten sind für die Optimierung geothermischer Anlagen essentiell (3). Der autonome Messroboter wird nach einigen Modifikationen auch eine Rauigkeitsbeurteilung von Böden zulassen (3), die Innovationspotential birgt. Neben den dynamischen Verformungen von Werkstücken im Laufe des Produktionsprozesses ist auch die Verformung von Bauwerken (Brücken, Windkraftanlagen) bei unterschiedlichen Betriebszuständen von Bedeutung (3). Bei Radioteleskopen wird durch gravitative Verformung unmittelbar die Lage des Antennenreferenzpunktes und damit die über sog. "local ties" erreichte Realisierung des globalen geodätischen Referenzrahmens beeinflusst. Eine sinnvolle Herangehensweise ist nur durch die durchgreifende Bauwerksmodellierung unter Einbeziehung von Materialparametern und Modellen der Kontinuumsmechanik möglich, wobei erste Erfahrungen im Rahmen einer Diplomarbeit bei der Modellierung von PHIL gesammelt wurden.

Ohne die Realisierung von entsprechenden Kalibriereinrichtungen und Messhilfsmitteln sind weder die Bereiche (1&2) leistbar noch ist die Gewährleistung der Einhaltung von Herstellerspezifikationen möglich (4). Eng damit verknüpft werden die Bestimmung von Störeinflüssen und Messunsicherheiten sein, sowohl unter deterministischen als auch stochastischen Aspekten, also das reine Forschungsgebiet der Metrologie (1). Hierunter sollen auch die weiteren Forschungen zum OTTM verstanden werden, die zusätzlich ein großes interdisziplinäres Potential für die Meteorologie bieten.

3.5.3 Lehre

Das aktuelle Lehrangebot des Lehrstuhls für Vermessungskunde und geodätische Sensorik umfasst Lehrveranstaltungen im Bachelor- und Master-Studiengang "Geodäsie und Geoinformatik". In der Grundausbildung im Bachelorstudiengang werden im Bereich Vermessungskunde und Geodätische Sensorik die notwendigen Grundlagen gelegt, um den Studierenden ein gutes Rüstzeug für die zukünftige Entwicklung in der Messtechnik mitzugeben. Ganz bewusst wird nicht nur auf vermessungstechnisches Instrumentarium fokussiert, sondern der Blick auf die dimensionelle Sensorik im Allgemeinen gerichtet. Dies geschieht nicht nur im

Hinblick auf die schnelle Entwicklung der Sensortechnologie, sondern auch aus der Erfahrung heraus, dass sich andere Ingenieurbereiche wie Informatik, Geotechnik, Bauwesen, Maschinenbau und andere mit erstaunlicher Leichtigkeit klassisch geodätische Messtechnologien (mehr oder weniger gut) aneignen und mit geodätischem Instrumentarium, teilweise auch in Kombination mit weiterer einfacher dimensioneller Sensorik, Vermessungsaufgaben äußerst effizient, elegant und verblüffend lukrativ erledigen. Die Studierenden sollen also möglichst früh mit den klassischen geodätischen Verfahren vertraut werden, aber auch die notwendigen Werkzeuge kennen und vor allen Dingen das notwendige Selbstvertrauen erhalten, um sich weitreichenderen Aufgaben als den klassisch-geodätischen stellen zu können. Die praktischen Fertigkeiten werden durch ein umfangreiches Angebot an praktischen Übungen ergänzt.

Im Masterstudium werden diese Grundlagen dann im Hinblick auf die Aufgaben der Ingenieurvermessung vertieft. Das Fach Ingenieurvermessung I versteht sich ganz bewusst als integrierendes Element, in dem profilübergreifende Lehrinhalte, wie Grundlagen zur Definition von Bezugssystemen und vor allen Dingen Methodik der Projektabwicklung sowie Projektmanagement vermittelt werden. Durch das Fach Sensorik der Ingenieurvermessung lernen die Studierenden ein großes Spektrum der verbreiteten Messsysteme kennen und verfügen somit über das Repertoire, die – sich anders als in der amtlichen Vermessung immer in einem neuen Kontext und mit neuen Randbedingungen stellenden – Ingenieurvermessungsaufgaben erfolgreich bearbeiten zu können. Im (optionalen) Fach Ingenieurvermessung II werden Fallbeispiele vorgestellt und in Seminarform mit den Studierenden hinsichtlich möglicher Varianten diskutiert. In einem gleichfalls optionalen Fach wird anhand eines praktischen Falles in einem Rollenspiel die Projektakquisition geübt, oder, je nach Eignung, den Studierenden ermöglicht, einen aktuell bearbeiteten Vermessungsauftrag am GIK zu begleiten.

Dem immer größere Bedeutung gewinnenden Bereich der kinematischen Vermessung wird durch das Angebot eines entsprechenden Faches Rechnung getragen. Auch dieses wird durch Übungen unterstützt, wo unter anderem die Messwerterfassung durch selbst entwickelte Software erfolgen soll.

Als einziger Standort im deutschsprachigen Ausbildungsbereich bieten wir mit dem sehr credit-starken Profilmfach "Large Volume Metrology (LVM)" eine fundierte Ausbildung für Vermessungsaufgaben in der Fertigungsmesstechnik. Hier wird vor allem Wert auf die Erfordernisse des Maschinenbaus gelegt. Aufgrund von großzügigen Spenden von Instrumentenherstellern steht uns ein fast vollständiger Instrumentenpark (bestehend aus zwei Lasertrackern, einem Messarm mit Nahbereichsscannern, elektronischem Kollimator, Interferometer, Präzisions(video)tachymeter) für die praktischen Übungen in der LVM zur Verfügung. Dies

führte in der Vergangenheit dazu, dass verschiedene große Konzerne das Potential der auch geodätisch geschulten Vermessungsingenieure erkannt haben und die entsprechenden Abteilungen deutlich häufiger mit Absolventen des Studiengangs "Geodäsie und Geoinformatik" besetzten. Zur Graduiertenförderung, Weiterbildung und Initialisierung von interdisziplinären Netzwerken wurde mehrfach die Veranstaltung "Optische Messtechnik für Anwendungen im Maschinenbau (OMAM)" durchgeführt, die mit einem praxisbezogenen Veranstaltungsteil den Teilnehmern den Zugang zu Methoden der LVM erleichterte.

Inhaltlich werden den Studierenden neben Fachwissen auch Kompetenzen für die zukünftigen Führungsaufgaben (Projektmanagement, Kostenschätzung) vermittelt. Daher wird im Masterstudiengang die Veranstaltung "Projektakquisition" in Form eines Rollenspiels angeboten, in der die Studierenden an einem Fallbeispiel mit den im Rahmen einer Auftragsbeschaffung zusammenhängenden Aufgaben in Berührung kommen. Diese Veranstaltung setzt die in den Feldprojekten (HVÜs) gewonnenen Erfahrungen voraus, bei denen die Studierenden selbstorganisiert in fachlich aufeinander aufbauenden ein- und zweiwöchigen Projekten deren Management üben. Hier greifen verschiedene Fachaspekte wie Sensorik, Messmethodik, mathematische Modellierung, GIS sowie rechtliche Rahmenbedingungen (Kataster) ineinander. Für dieses bewährte und einmalige Konzept erhielt die Veranstaltungsreihe den Fakultätslehrpreis 2017. Die HVÜs werden in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Geoinformatik durchgeführt.

Die Doktoranden erfahren besondere Unterstützung durch ihre Teilnahme am Doktorandenseminar "Ingenieurgeodäsie" der DGK. Hier werden die doktorandengetragenen wissenschaftlichen Diskussionen professoral initiiert und didaktisch gelenkt. Herrn Ulrich wurde im Rahmen des GRACE-Programms⁷ der Aufenthalt bei der nationalen britischen Eichinstitution (NIST) ermöglicht.

⁷ GRACE-Programm: Graduiertenschule des KIT-Zentrum Klima und Umwelt

Die Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts (1904 - 1989)

Hermann Mälzer¹

Am 24. Januar 1880 fand im Oberrheingraben etwa 20 km nordwestlich von Karlsruhe ein starkes Erdbeben statt, das in den umliegenden Gemeinden auch einigen Schaden hinterließ und später wegen der relativ großen makroseismischen Ausdehnung als das Rheinisch-Schwäbische Beben bezeichnet wurde. Im vorangegangenen Jahr hatten sich bereits drei Erdbeben ereignet, die im südlichen Schwarzwald fühlbar waren. Durch diese Naturereignisse veranlasst, wurde am 6. Februar 1880 auf der Sitzung des Naturwissenschaftlichen Vereins zu Karlsruhe, an der auch der Großherzog Friedrich teilnahm, auf Vorschlag des damaligen Vorstandes, Geheimrat Grashof, eine Erdbebenkommission gebildet, die einmal die Erdbebenherde in Baden lokalisieren und zum anderen die aufgetretenen Erschütterungen untersuchen sollte. Als Mitglieder gehörten ihr die Professoren Jordan, Knop, Sohncke und der Rentner Gustav Wagner an. Es war der erste für Erdbebenbeobachtungen organisierte Dienst in Deutschland.

Bald darauf, in den Jahren 1884 bis 1887, begann der damalige Assistent an der Großherzoglichen Sternwarte zu Karlsruhe E. v. Rebeur-Paschwitz (1887 bis 1895 in Straßburg tätig) mit den ersten Seismographen, die von ihm nach dem Prinzip der Horizontalpendel konstruiert worden waren, Fernbeben systematisch aufzuzeichnen. Trotz dieser sich anbahnenden instrumentellen Entwicklung war man noch auf direkte oder makroseismische Beobachtungen angewiesen. Im ganzen Land Baden wurden Fragebogen verteilt, um die seismischen Ereignisse eintragen zu lassen. Dadurch kam im Laufe der Zeit ein umfangreiches makroseismisches Beobachtungsmaterial zusammen, das jahrzehntelang von dem bei der Großherzoglichen Oberdirektion des Wasser- und Straßenbaues errichteten "Centralbüro für Meteorologie und

¹ Überarbeiteter Beitrag aus der Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts aus dem Jahr 1993

Hydrographie" gesammelt wurde. Von 1880 bis 1905 hatte die Erdbebenkommission des Naturwissenschaftlichen Vereins, die in ihrem Bestreben von den kaiserlichen Post- und Telegraphenbehörden bereitwilligst unterstützt wurde, aufgrund dieser makroseismischen Meldungen elf Veröffentlichungen und Forschungsarbeiten herauszugeben (u. a. K. Futterer: Das Erdbeben vom 22. Januar 1896 im Badischen Oberland).

Durch die Fortschritte in der instrumentellen Seismik angeregt, schlug Geheimrat Prof. M. Haid, der 1882 als Nachfolger von Prof. W. Jordan Direktor des Geodätischen Instituts der Technischen Hochschule geworden war und 1903 den Vorsitz der Erdbebenkommission übernommen hatte, dem Naturwissenschaftlichen Verein vor Seismographen aufzustellen. Daraufhin wurden 1904 zwei Horizontalpendel nach der Konstruktion von Prof. O. Hecker (Potsdam) mit photographischer Registrierung angeschafft. Mit diesen Geräten, die vom Mechanikermeister M. Fechner in Potsdam gebaut worden waren, sollten neben den Erdbeben auch bradyseismische Bewegungen, d. h. langsame und langperiodische Vorgänge, zu denen auch die Erdgezeiteneffekte gehören, registriert werden. Wegen der Temperaturempfindlichkeit mussten die Instrumente in temperatursicheren Räumen aufgestellt werden. Als Aufstellungsorte wurden ein aus dem Mittelalter stammender Stollen am Turmberg in Durlach und ein Felsenkeller unter dem Schlossberg in Freiburg ausgewählt. Beide Stationen sollten wohl zugleich den Grundstein zu einem seismologischen Netz in Baden bilden, für das sieben Stationen 1. Ordnung und elf Stationen 2. Ordnung vorgesehen waren. Den Vorschlag, dieses Netz zu errichten, hatte bereits Dr. K. Futterer, der in Karlsruhe bis 1905 als Professor der Mineralogie und Geologie wirkte, der ersten seismologischen Konferenz unterbreitet, die 1901 auf Einladung des Deutschen Reiches in Straßburg zusammengetreten war um eine internationale Assoziation für Erdbebenforschung zu gründen.

Die Ausbaukosten der Stollen in Durlach und Freiburg, die 1905 rund 13.000 Mark betragen, wurden größtenteils aus Mitteln des Naturwissenschaftlichen Vereins und einer Stiftung von Frau Landgerichtsrat Bohm, die 16.000 Mark für Zwecke der Erdbebenforschung testamentarisch hinterlassen hatte, bestritten. Seit dieser Zeit war der Direktor des Geodätischen Instituts zugleich Direktor der an das Institut angeschlossenen Erdbebenwarte. Teilergebnisse der Stationen von Durlach und Freiburg fanden in einer bedeutsamen Arbeit von Prof. Haid über den Gezeiten- und Starrheitskoeffizienten der festen Erde ihren Niederschlag. Dieser Veröffentlichung wurde von der wissenschaftlichen Welt große Beachtung beigemessen. In Durlach wurde u. a. auch das historische Erdbeben vom 18. April 1906 aufgezeichnet (Abb. 22), das zur fast völligen Zerstörung der Innenstadt von San Francisco führte. Beide Stationen, deren Betrieb seitens des Geodätischen Instituts unter großer Opferbereitschaft aufrecht erhalten wurde, fielen dem Mangel an Geld und Personal und nicht zuletzt den Wirren des ersten

Weltkrieges und seiner Folgeerscheinungen zum Opfer. Alle Bemühungen, vor allem die Freiburger Station wieder neu zu beleben, blieben erfolglos.

Es zeigte sich bald, dass man die Untersuchung bradyseismischer Effekte und die Registrierung von Erdbeben mit Hilfe der Heckerschen Pendel nicht gleichzeitig exakt durchführen konnte, da die Eigenperiode der Instrumente und auch die Registriergeschwindigkeit jeweils andere Einstellungen erforderten. Daher wurde schon frühzeitig erörtert, weitere Geräte, besonders Seismographen zur speziellen Erdbebenregistrierung nach dem Prinzip von Mainka, aufzustellen. Erstmals in einem Bericht vom Jahre 1908 wird ein Mainka-Pendel mit einer stationären Masse von 140 kg erwähnt, das in einem Kellerraum des Geodätischen Instituts aufgestellt worden war und brauchbare Ergebnisse lieferte. Offenbar wurde dieser Seismograph von Dr. C. Mainka, der zu dieser Zeit als Geophysiker in Straßburg tätig war, an Prof. Haid für Proberegistrierungen übergeben.

Durch einen Ministererlass wurden 1912 dem Naturwissenschaftlichen Verein Geldmittel aus der sog. Kettnerstiftung zugesagt und diese durch einen weiteren Erlass dem Direktor des Geodätischen Instituts für die Erdbebenforschung zur Verfügung gestellt. Mit diesen Mitteln wurden 1914 zwei Horizontalpendel nach Mainka mit einer Masse von je 2.000 kg und einer Eigenperiode von 8 - 10 s angeschafft, die von der Firma J. & A. Bosch (Straßburg) gefertigt worden waren.

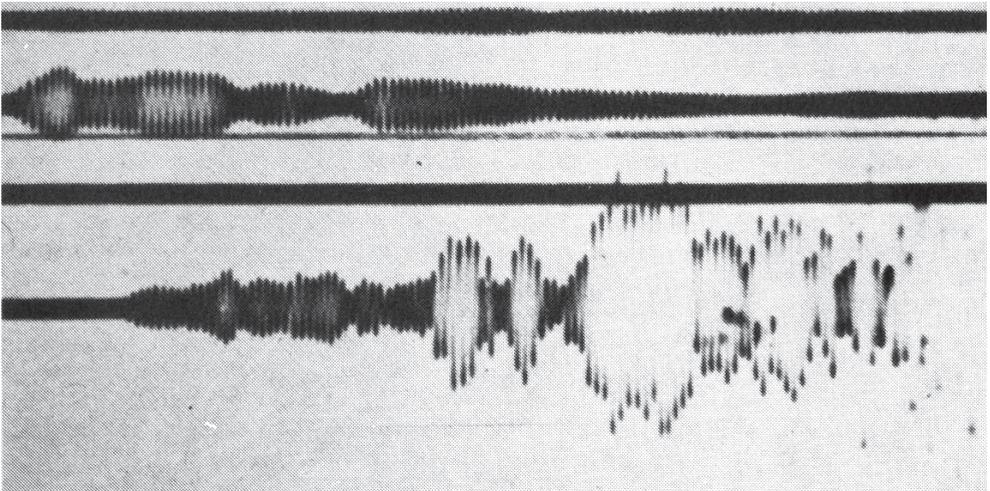


Abb. 22: Photographische Registrierung des Erdbebens von San Francisco am 18. April 1906.
Registriert mit dem Horizontalpendel nach Hecker, Station Durlach.

Beide Seismographen, die von Straßburg nach Karlsruhe kamen, wurden in einem oberirdischen Raum über der bereits vorhandenen unterirdischen Station Durlach aufgestellt, nachdem bereits 1912 die entsprechenden Standpfeiler errichtet worden waren. Infolge des Kriegsausbruches musste die Anschaffung eines Vertikalseismographen zurückgestellt werden, und es sollte mehr als zwei Jahrzehnte dauern, bis diese dritte Komponente hinzugefügt werden konnte. Bis 1917 konnte der Stationsbetrieb nur mühsam aufrecht erhalten werden, und in den Jahren nach dem ersten Weltkrieg machte sich die beginnende Inflation verheerend bemerkbar.

Die Nachfolge von Geheimrat Prof. Haid hatte 1917 Geheimrat Prof. M. Näbauer angetreten, der auch die Erdbebenkommission unter seinem Vorsitz neu ins Leben rief. Er schlug 1922 vor, die Mainka-Pendel so schnell wie möglich, trotz der nicht sehr günstigen geologischen Untergrundverhältnisse, in die Kellerräume des Geodätischen Instituts im Aulabau der Technischen Hochschule zu bringen, um die Geräte und die Station vor dem völligen Zerfall zu retten. Vom 8. Juni 1923 liegt ein Bericht vor, dass infolge der Geldentwertung der Betrieb der Erdbebenstation Durlach überhaupt nicht mehr durchführbar war. Der Transport der Instrumente von Durlach nach Karlsruhe wurde mit 750.000 Mark und der Wiederaufbau in Karlsruhe mit 5 Millionen Mark veranschlagt. Wenige Tage später waren diese Ausgaben schon um ein Vielfaches überholt! Durch die Einführung der sog. Rentenmark waren die Inflationsercheinungen plötzlich, gleichsam über Nacht, beendet. In einem Bericht vom 5. Mai 1925 konnte Prof. Näbauer erfreut melden, dass mit finanzieller Hilfe des Naturwissenschaftlichen Vereins die beiden großen Mainka-Pendel auf zwei errichteten Pfeilern in einem besonderen Kellerraum des Geodätischen Instituts neu aufmontiert seien. Gleichzeitig waren zwei weitere Pfeiler für einen Vertikalseismographen, auf dessen Notwendigkeit in den Tätigkeitsberichten immer wieder hingewiesen wurde, und für zwei kombinierte kleine Mainka-Pendel gegründet worden. Bei allen diesen Arbeiten hatte der Mitarbeiter von Prof. Näbauer, Dr. H. Merkel, tatkräftig mitgewirkt.

1926 folgte Prof. Näbauer einem Ruf nach München. Sein Nachfolger als Direktor des Geodätischen Instituts und der Erdbebenwarte wurde Prof. A. Schlötzer, der zugleich den Vorsitz der Erdbebenkommission des Naturwissenschaftlichen Vereins übernahm. Seit dieser Zeit wurden die Erdbebenaufzeichnungen systematisch analysiert und bis 1931 vierteljährlich und ab 1932 bis 1940 halbjährlich im Druck veröffentlicht. Für den Zeitraum von 1906 bis 1923 liegen von den Stationen Durlach und Freiburg nur einzelne Auswertungen und Beschreibungen von Erdbeben handschriftlich vor.

Für den erforderlichen Zeitdienst wurden bis 1926 die Kontaktuhren der Erdbebenwarte wöchentlich einmal über eine Postleitung telegraphisch mit den Uhren der Landessternwarte auf

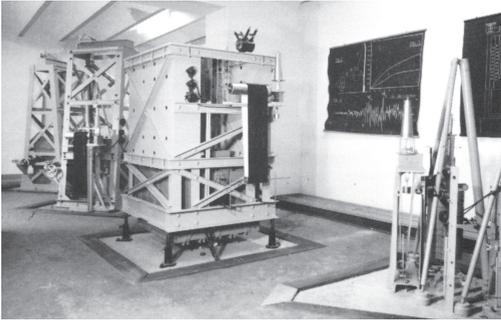


Abb. 23: Hinten beide Mainka-Horizontalseismographen (EW- und NS-Komponente), in der Mitte der Wiechert-Vertikalseismograph, vorne rechts einer der beiden kleinen Mainka-Horizontalseismographen (EW-Komponente).

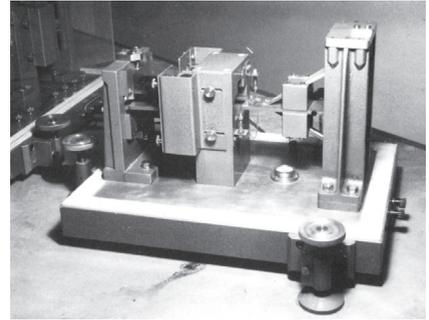


Abb. 24: Induktionsseismometer der Bauart "Stuttgart", Horizontalkomponente.

dem Königstuhl bei Heidelberg verglichen. Im Jahre 1925/26 wurde der Zeitdienst durchgreifend geändert. Mit einer vom Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule zur Verfügung gestellten Empfangsanlage wurden die Koinzidenzsignale der Großfunkstationen, u. a. der Station Nauen, empfangen und über einen Chronographen mit den Sekunden- und Minutenkontakten der Steueruhren der Erdbebenwarte verglichen. Ab 1962 erfolgte die Zeitangabe durch eine Quarzuhr, deren Zeitkontakte mittels eines Oszilloskops mit den empfangenen Zeitsignalen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (DCF 77) verglichen wurden. Eine selbst entwickelte Anlage für den Zeitdienst übernahm später die direkte Übertragung empfangener Zeitsignale auf die Registriereinrichtungen der Seismometer.

Prof. Schlötzer führte bald nach seinem Dienstantritt die Neuorganisation des makroseismischen Dienstes in Baden durch, da die direkten Beobachtungen in den Erschütterungsgebieten nach wie vor wertvolle Ergänzungen zu den instrumentellen Aufzeichnungen lieferten. Im Jahre 1933 waren mehr als 1.200 Beobachter in 850 Gemeinden Badens eingesetzt. Der für das Land Baden mustergültig organisierte makroseismische Dienst ist im zweiten Weltkrieg völlig zerfallen. Nach dem Kriege war zunächst ein Neuaufbau aus Mangel an Mitteln und Personal nicht möglich. Vereinbarungsgemäß wurde aus wirtschaftlichen und organisatorischen Gründen der ganze makroseismische Dienst für den Bereich des neuen Südweststaates vom Landeserdbebedienst in Stuttgart übernommen.

Im Jahre 1935 war es endlich möglich, den schon längst erforderlichen Vertikalseismographen auf dem vorgesehenen Pfeiler aufzustellen. Das von der Firma Spindler & Hoyer in Göttingen gelieferte Instrument war nach Angaben von Prof. E. Wiechert (Göttingen) konstruiert und besaß eine stationäre Masse von 1300 kg und eine regulierbare Eigenperiode von etwa 1,5 - 7 s

(siehe Abb. 23). Bald darauf wurde das bereits vorhandene kleine Mainka-Pendel (140 kg, später auf 170 kg erhöht) durch eine zweite Komponente mit einer Masse von 170 kg und einer Periode von 2 - 5 s ergänzt. Infolge der kürzeren Eigenperiode (3 - 4 s) waren diese Geräte besser geeignet Nahbeben aufzuzeichnen.

Kurz nach dem Ausbruch des zweiten Weltkrieges musste die Tätigkeit der Erdbebenwarte infolge Einberufung des Personals eingestellt werden. Der letzte noch erschienene Erdbebenbericht umfasste das erste Halbjahr 1940. Im September 1942 wurden die Seismographen bei einem Fliegerangriff und durch Eindringen von Wasser in den Stationsraum stark beschädigt. Nach dem Krieg war es Prof. H. Merkel, der die Erdbebenwarte unter Mitwirkung des Assistenten am Geodätischen Institut Dr. R. Herminghaus neu aufbaute und wieder in Betrieb setzte. Gleichzeitig wurde damit begonnen, die Seismographen mechanisch zu überholen und zu verbessern, sodass die relativ alten Geräte den neuen Anforderungen besser entsprachen. Die Arbeiten führte der Mechanikermeister F. Schmitt mit größter Sorgfalt aus. Ab Mai 1949 wurden wieder die Ergebnisse der seismischen Registrierungen den interessierten in- und ausländischen Stationen mitgeteilt.

Im Jahre 1952 übernahm Prof. H. Merkel, der sich auf Grund seiner jahrzehntelangen Tätigkeit am Geodätischen Institut schon seit der Durlacher Zeit mit der Erdbebenwarte aufs Engste verbunden fühlte, das Direktorium. Unter seiner Leitung wurden die Station weiter ausgebaut und die Instrumente fortlaufend verbessert. Vor allem galt es, die Gewichtsaufzüge für den Antrieb der Registrierwerke durch elektrisch betriebene Aufzugsmotoren zu ersetzen und die Hebelsysteme für die mechanische Vergrößerung reibungsfreier zu gestalten.

Wegen der Erneuerung und des Ausbaues der Stationsräume musste der Betrieb von August 1958 bis Juni 1960 stillgelegt werden. Gleichzeitig mit dem Wiederbeginn der Registrierungen im Juli 1960 wurden in der Erdbebenwarte neben den bereits vorhandenen 5 Seismographen ein homogener Satz kurzperiodischer Induktionsseismometer (Abb. 24) der Bauart "Stuttgart", bestehend aus 3 Komponenten, auf einem neu erstellten, 8 m tief gegründeten Pfeiler aufgestellt. Die Instrumente waren nach den Entwicklungen und Konstruktionen von Prof. W. Hiller und Prof. H. Berckhemer, Stuttgart, von der Schule für Feinwerktechnik in Schweningen gebaut worden. Mit diesen Seismometern konnte nunmehr neben den Nahbeben auch der kurzperiodische Anteil der Raumwellen von Fernbeben (Abb. 25) genauer erfasst und aufgezeichnet werden.

1964 stellten der Mechanikermeister und Leiter der institutseigenen Werkstatt F. Schmitt und der Verfasser eine Tintenregistrierung vor, die die althergebrachte Registrierung auf berußtem Papier ablösen sollte und die an den Registriereinrichtungen der Stuttgarter Seismometer

erfolgreich erprobt wurde. In den folgenden Jahren bis 1967 konnten die fünf älteren Seismographen von der mechanischen auf elektronische Verstärkung umgerüstet werden, die es erlaubte, auch bei diesen Geräten die Tintenregistrierung zu übernehmen. Als geeignete Bauelemente erwiesen sich die induktiven Wegaufnehmer und Verstärkereinheiten der Firma Hottinger Baldwin, Darmstadt. Um unabhängig von Stromstörungen zu sein, wurde gleichzeitig die gesamte Stromversorgung für den Antrieb der Registriereinrichtungen mittels Synchronmotoren und für die Zeitanlage an eine vom Stromnetz gepufferte 24-Volt-Batterie mit Spannungswandler (220 V, 50 Hz) angeschlossen. Die hierzu erforderlichen Arbeiten führten die Mechanikermeister F. Schmitt und J. Follath, der die synchron betriebenen Registrierwerke mit wählbaren Geschwindigkeiten von 15, 30, 60 und 120 mm/min konstruiert und gefertigt hatte, mit großem Sachverstand aus.

In der Fakultät für Physik wurde 1964 ein Geophysikalisches Institut geschaffen, dessen erster Direktor Prof. St. Müller war. Ihm folgte nach seiner Abberufung an die ETH Zürich 1970 Prof. K. Fuchs nach. Zur Erforschung der seismischen Aktivitäten Südwestdeutschlands, speziell des Oberrheingrabens und der angrenzenden Gebiete, wurde im Rahmen von DFG-Projekten in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre mit dem Aufbau eines Rheingraben-Stationsnetzes begonnen. Die mit dem Geophysikalischen Institut telemetrisch verbundenen Stationen waren mit modernen Seismometern "S-13, Geotech (USA)" bestückt worden. Um die unmittelbar im Oberrheingraben gelegene Station Karlsruhe des Geodätischen Instituts besser als bisher in dieses Stationsnetz zu integrieren, war 1977 die Beschaffung eines Seismometers desselben Typs mit entsprechender elektronischer Verstärkereinheit erforderlich. Zuvor waren Ende 1976 die beiden Mainka-Horizontalseismometer mit der stationären Masse von je 2.000 kg stillgelegt worden. Trotz der 10 Jahre vorher erfolgten Umstellung auf elektronische Verstärkung entsprachen sie nicht mehr den Erwartungen.

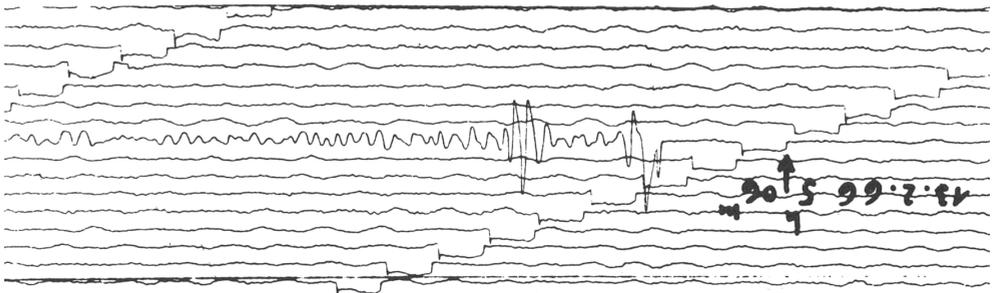


Abb. 25: Registrierung einer unterirdischen nuklearen Explosion aus dem Gebiet von Semipalatinsk mit dem Seismometer "Stuttgart" (Vertikalkomponente, Tintenregistrierung).

Nach dem Ausscheiden von Dr. Herminhaus im Jahre 1951 übernahm bis 1953 Dipl.-Ing. S. Jäckel den täglichen Stationsdienst und die Analyse der seismometrischen Aufzeichnungen. Anschließend wurden diese Aufgaben bis 1956 dem Verfasser übertragen; danach gingen die Stationsarbeiten (Betreuung und Auswertung) an Dipl.-Ing. R. Heidel über; sie wurden ab 1959 von Dipl.-Ing. T. Farkas übernommen. Nach der Rückkehr des Verfassers 1962 an das Geodätische Institut wurde er zugleich mit der Wahrnehmung der Observatorentätigkeit an der Erdbebenwarte betraut. 1965 verstarb Prof. Merkel, der nach seiner Emeritierung 1959 die Leitung der Erdbebenwarte beibehalten hatte; im selben Jahr ging die Leitung der Erdbebenwarte an den Verfasser über, der diese bis 1988 innehatte. Im Zuge der erweiterten seismischen Beobachtungen im Bereich des Oberrheingrabens, unter der Federführung des Geophysikalischen Instituts, führte ab 1967 die Dipl.-Physikerin U. Hagele für zwei Jahre die seismologischen Analysen aus. Nach einer kurzzeitigen Mitarbeit von Dr. D. Mayer-Rosa sorgte bald darauf (ab 1971) Dr. K. Bonjer (beide Geophysikalisches Institut) für die Übernahme der im Geodätischen Institut aufbereiteten Registrierergebnisse in die seismologischen Berichterstattungen. Bei diesen immer noch umfangreichen Stationsarbeiten (Aufbereitung der Registrierergebnisse, Überwachung des laufenden Stationsbetriebs und der Seismometer) wirkten weiterhin mit studentischer Unterstützung die Angehörigen des Geodätischen Instituts Dr. T. Farkas und Dr. H. Seckel unter außerdienstlichem Zeitaufwand mit. Die täglichen routinemäßigen technischen Arbeiten übernahm ab 1980 stundenweise der Technische Angestellte H.-P. Kuhnmüch.

Von 1952 bis 1967 wurden die Ergebnisse der Analysen von jährlich 350 - 400 registrierten Erdbeben in Jahresberichten unter dem Titel "Seismometrische Beobachtungen der Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts der Technischen Hochschule Karlsruhe" veröffentlicht. Ab 1964 war die Erdbebenwarte Karlsruhe (KRL) dem internationalen seismologischen Dienst angeschlossen (Bureau Central International de Seismologie, Strasbourg; US Coast and Geodetic Survey, Washington; International Seismological Research Centre, Edinburgh). In enger und freundschaftlich verbundener Zusammenarbeit mit dem Geophysikalischen Institut der Universität Karlsruhe erschien 1970 mit dem Titel "Seismologischer Jahresbericht Bühlerhöhe (BUH) und Karlsruhe (KRL) 1968" ein gemeinsamer Bericht zweisprachig (U. Hagele, H. Mälzer, D. Mayer-Rosa). Ab 1969 bis 1974 waren die Registrierergebnisse der Erdbebenwarte Karlsruhe (KRL) in den jährlichen Landesberichten "Seismological Bulletin of the Seismological Stations of the Federal Republic of Germany" (Hrsg. Seismologisches Zentralobservatorium Gräfenberg) und von 1975 bis 1988 in den jährlich erscheinenden "Data Catalogue of Earthquakes in the Federal Republic of Germany and adjacent Areas" (Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR, Hannover) integriert.

Ende September 1988 trat der Verfasser in den Ruhestand. Der für den Fortbestand der Erdbebenwarte erforderliche Personalaufwand, die rasante technische Entwicklung, der man für die Aufrechterhaltung des Observatoriumbetriebs hätte gerecht werden müssen, und die ungünstige Lage der Station im Stadtgebiet gaben der Institutsleitung Anlass, die Erdbebenwarte zu schließen. Somit wurde im Einvernehmen mit dem Geophysikalischen Institut der Betrieb der Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts Karlsruhe nach 85 Jahren traditionsreichen Bestehens am 31. Januar 1989 eingestellt.

Ein Seismograph der Bauart Mainka (2.000 kg-Pendel) wurde 1990 im Heimatmuseum von Jungingen im alten Zustand wieder aufgestellt. Nach dem 1. Weltkrieg war die Firma Bosch, die dieses Gerät 1914 gebaut und nach Karlsruhe geliefert hatte, von Straßburg nach Jungingen übergesiedelt. Die für die Wiederaufstellung und Erhaltung des Seismographen erforderlichen Arbeiten wurden vom Mechanikermeister J. Follath und dem Verfasser ausgeführt. Der alte Stationsraum im Keller des Geodätischen Instituts wird seither als Museum genutzt, in dem auch alte Seismographen als historische Stücke erhalten bleiben.

Ergänzende Literatur zur Geschichte der Erdbebenwarte

- Futterer, K. (1901): Berichte über die Verhandlungen der ersten Internationalen seismologischen Konferenz in Straßburg vom 11. - 13. April 1901. Vortrag im Naturwissenschaftlichen Verein am 28. Juni 1901, Manuskript der Institutsbibliothek.
- Futterer, K. (1901): Die Erdbebenforschung in Baden. Vortrag auf der internationalen seismologischen Konferenz zu Straßburg, wahrscheinlich 1901, Manuskript der Institutsbibliothek.
- Haid, M. (1906): Die seismischen Stationen Durlach und Freiburg i. B.. Denkschrift zum 25-jährigen Bestehen der Erdbebenkommission des Naturwissenschaftlichen Vereins in Karlsruhe. Braunsche Hofbuchdruckerei, Karlsruhe 1906.
- Tätigkeitsberichte (1912 - 1966) über die seismischen Stationen Durlach und Freiburg und die spätere Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts der Technischen Hochschule Karlsruhe von 1912 bis 1966. Manuskripte im Archiv der Erdbebenwarte, zum Teil veröffentlicht in den Beiträgen zur naturkundlichen Forschung in Südwestdeutschland, Karlsruhe.
- Haid, M. (1913): Gezeiten- und Starrheitskoeffizienten der festen Erde, abgeleitet aus den Registrierungen der Horizontalpendel in Freiburg i. B. und Durlach. Verhandlungen der internationalen Erdmessung, Leiden 1913.
- Mitteilungen (1926 - 1940) der Erdbebenwarte des Naturwissenschaftlichen Vereins im Geodätischen Institut der Technischen Hochschule Karlsruhe. Nr. 1 (1926) - Nr. 40 (1940), Nr. 41 (1949) - Nr. 44 (1951), Viertel- bzw. Halbjahresberichte, erschienen im Selbstverlag.

- Jahresberichte (1952 - 1958 und 1960 - 1967): Seismometrische Beobachtungen der Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts der Technischen Hochschule Karlsruhe 1952 - 1958 und 1960 - 1967. Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts der Technischen Hochschule Karlsruhe, Jahresberichte, erschienen im Selbstverlag.
- Merkel, H. (1958): Seismometrische Beobachtungen und Forschungen des Geodätischen Instituts der Technischen Hochschule Karlsruhe. Zeitschrift für Vermessungswesen, 9/1958, S. 289 - 292.
- Merkel, H. (1962): Geschichte und Aufgaben der Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts und des Naturwissenschaftlichen Vereins an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Beitrag zur naturkundlichen Forschung SW-Deutschlands, Bd. XXI, Heft 1, Karlsruhe 1962, S. 7 - 17.
- Mälzer, H. (1964): Eine Tintenregistrierung für Seismographen. Zeitschrift für Geophysik, Jhrg. 30, 1964, S. 245 - 248.
- Merkel, H. (1964): Der unterirdische Gang im Turmberg und seine spätere Verwendung zur Errichtung einer Erdbebenwarte in Durlach. Kulturhistorischer Beilage des Durlacher Tageblatts "So weit der Turmberg grüßt", 16.7.1964.
- Merkel, H. (1965): Überblick über die Arbeiten der Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts und des Naturwissenschaftlichen Vereins an der Technischen Hochschule Karlsruhe für die Jahre 1961 bis 1964. Beitrag zur naturkundlichen Forschung SW-Deutschlands, Bd. XXIV, Heft 2, Karlsruhe 1965, S. 123 - 125.
- Mälzer, H. (1968): Entstehung und Geschichte der Erdbebenwarte. In: Geodätisches Institut der Universität Fridericiana Karlsruhe 1868 - 1968. C.F. Müller Buchdruckerei und Verlag GmbH, Karlsruhe 1968, S. 47 - 51.
- Mälzer, H. (1969): Die Erdbebenwarte des Geodätischen Instituts der Universität (TH) Karlsruhe in den Jahren 1965 bis 1967. Beitrag zur naturkundlichen Forschung SW-Deutschlands, Bd. XXVIII, Heft 1, Karlsruhe 1969, S. 5 - 8.
- Mälzer, H. (1970): Die Erdbebenwarte Karlsruhe, Tätigkeit in den Jahren 1968 bis 1970 und ihre Stellung im internationalen Stationsnetz. Beitrag zur naturkundlichen Forschung SW-Deutschlands, Bd. XXIX, Heft 2, Karlsruhe 1970, S. 103 - 106.
- Mälzer, H. (1990): Instrumentelle Entwicklung zur Erdbebenforschung bis zum 1. Weltkrieg und die Bosch-Mainka Seismographen an der Erdbebenwarte zu Karlsruhe. Manuskript, Heimatmuseum Jungingen, 1990.

Kreismessungen am Geodätischen Institut

Klaus Lindner

1 Einleitung

Ab dem Wintersemester 1974/75 übernahm der Verfasser die im Lehrplan für Geodäten im 7. Studiensemester vorgesehene Vorlesung und Übung "Kreiselvermessung".

Orientierungsmessungen mit Vermessungskreiseln haben ihre spezielle Anwendung im Tunnelbau, im Bergbau und in relativ wenig vermessenen Gebieten, d. h. in Gebieten ohne koordinierte Festpunkte wie Wüsten, Steppen, Urwald, in arktischen und antarktischen Bereichen sowie als Kreiselkompass in der See- und Luftfahrt. Kreisel sind zusammen mit Beschleunigungsmessern die Herzstücke von Inertialvermessungssystemen. Dass Kreisel als Laserkreisel auch zur Bestimmung der Schwankungen der Richtung der Erdachse im Raum und als Faserkreisel zur Stabilisierung von bewegten Körpern wie Schienenfahrzeugen, Raketen, Raumfahrzeugen und für diverse Steuerungen im militärischen Bereich dienen, sei hier nur am Rande erwähnt. Dabei handelt es sich allerdings nicht um Vermessungskreisel.

2 Vorlesung und Übungen zum Thema geodätische Kreiselorientierung

Das Geodätische Institut besitzt zwei Theodolit-Aufsatzkreisel vom Typ WILD GAK 1, der im folgenden näher beschrieben wird. Diese Geräte sind keine autonomen Vermessungskreisel, sondern bedürfen eines sie tragenden Theodoliten, auf den sie adaptiert werden müssen.

Vermessungskreisel bestehen aus einem Rotor, der den eigentlichen Kreisel darstellt. Dieser rotiert, elektrisch angetrieben, mit einer Drehzahl von ca. 22.000 Umdrehungen pro Minute und ist an einem Trageband frei aufgehängt. Damit ist seine Drehachse (Rotationsachse) infolge der Schwerkraft stets in eine horizontale Lage gezwungen.

Der Kreisel führt im Verlaufe des Messvorganges an seinem Trageband hängend Drehschwingungen um die Meridianebene aus. Seine Gleichgewichts- oder Ruhelage ist die Meridianrichtung, weil im Meridian Kreiseldrehachse und Erddrehachse einen minimalen räumlichen Winkel miteinander einschließen. Die Kreiselgesetze, durch die dieser Vorgang mathematisch beschrieben werden kann, sind Ausdruck des "Minimumprinzips", das in der Natur oft zu beobachten ist.

Das Trageband ist nur 1 mm breit und ca. 15 cm lang und stellt praktisch eine Torsionsachse dar. Aus den Umkehrpunkten "West" und "Ost" der Drehschwingung des Kreisels wird über die sogenannte Schulersche Mittelbildung die Gleichgewichtslage (Mittelposition der Drehschwingung), also die Meridianrichtung, ermittelt. Mit Hilfe des Theodolitfernrohrs wird diese Richtung nach außen übertragen. Das Verfahren ist für den Laien nicht auf den ersten Blick einsichtig, wird aber an einem entsprechenden Modell recht bald verständlich.

Der Kreisel "spürt" also, dass er sich auf einer im Inertialraum drehenden Unterlage befindet. Man kann folglich innerhalb eines nach außen abgeschlossenen Raumes nur mit Hilfe eines Vermessungskreisels die astronomische Nordrichtung bestimmen. Damit sind Kreismessungen im Berg- und Tunnelbau geeignet, unabhängig von geodätischen Richtungsübertragungen von Übertage oder Doppellotungen in Schächten, astronomisch orientierte Richtungen zu bestimmen.

Die Übungsmessungen für Studenten fanden im Messkeller (heute Messlabor) des Geodätischen Instituts statt (siehe Abb. 26). Es gab zwei Aufgabenstellungen: Die erste Aufgabe bestand in der Bestimmung eines Kreiselazimuts von einem am Boden markierten Standpunkt nach einer ca. 12 m entfernten, an der Wand angebrachten Zielmarke. Dazu ist zu bemerken, dass sich das reine Kreiselazimut vom endgültigen astronomischen Azimut durch den so genannten Eichwert unterscheidet. Dieser Eichwert wurde bei der ersten Aufgabe vorgegeben. Die zweite Aufgabe bestand in der Bestimmung eben dieses Eichwertes bei gegebenem astronomischen Azimut. Bei diesem Eichwert handelt es sich um die Winkelabweichung des in Ruhe befindlichen Tragebandes von der Soll-Lage. Dieser Torsionsfehler des Tragebandes kann das Azimut bis in den Gradbereich verfälschen. Ermittelt wird der Eichwert durch Vergleich eines reinen Kreiselazimuts, also ohne Korrektur, mit einem astronomisch bestimmten Azimut als Sollwert. Dieses Sollazimut muss eine deutlich höhere Genauigkeit



Abb. 26: Kreismessung im Messkeller.



Abb. 27: Kreiseinsatz in der Antarktis.

als das Kreiselazimut besitzen. Am Geodätischen Institut erfolgte die Eichwertbestimmung deshalb auf dem Messdach, wo diese Bedingung erfüllt war.

Bei diesen Übungen wurde Wert darauf gelegt, dass jeder Student und jede Studentin eine eigene Messreihe, entweder bei der Grob- oder der Feinmessung, beobachtete. Während bei der Grobmessung, bei der der Theodolit dem dreh-schwingenden Kreiselindex gleichmäßig nachgeführt werden muss, besonderes Feingefühl des Beobachters gefragt ist, muss bei der Feinmessung eine Zehntelsekunden genaue Zeiterfassung beim Durchgang des bewegten Kreiselindex durch den Referenzindex des feststehenden Theodoliten erfolgen – ganz so wie bei Durchgangsbeobachtungen astronomischer Messungen. Die Grobmessung ist mit ihrer geringeren Genauigkeit Voraussetzung für die sich anschließende Feinmessung. Die Genauigkeit der Bestimmung eines astronomischen Azimuts mit einem Vermessungskreisel WILD GAK 1 liegt nach langjähriger Erfahrung des Verfassers bei $\pm 5''$ bis $\pm 10''$ unter der Voraussetzung eines adäquat genauen Eichwertes.

Die Kreismessübungen stellten hohe Anforderungen an das Feingefühl und die Konzentration der Übungsteilnehmer – was im GNSS-Zeitalter nur noch bei wenigen Arbeiten von den jungen Geodäten gefordert und geübt wird.

In den 1990er Jahren wurden die Kreiselübungen auch mit Studenten der Fachhochschule (jetzt Hochschule) Karlsruhe durchgeführt bis dort ein eigener Vermessungskreisel angeschafft worden war.

Im Rahmen der Kreiselvorlesung konnte auch das Thema "Die Erde als Kreisel" eingebunden werden, wobei die Begriffe Präzession und Nutation erklärt bzw. aufgefrischt werden konnten. Auch die geodätisch relevanten drei Nordrichtungen (astronomisch-, Gitter- und magnetisch Nord) und die dazugehörigen Bezeichnungen der Differenzen dieser Richtungen wurden erläutert.

3 Kreiseleinsätze in der Praxis

Bei folgenden Arbeiten und Projekten war der Verfasser mit einem Kreisel des Geodätischen Instituts eingebunden:

- mehrfache Orientierungen in den Stollen des Geowissenschaftlichen Observatoriums in Schiltach (Black Forest Observatory, BFO)
- Orientierung von Seismometern in verschiedenen erdwissenschaftlichen Observatorien (bundesweit)
- Kreismessung als Kontrolle einer geodätischen Richtungsübertragung im Kontrollgang der Schwarzenbachtalsperre bei Forbach im Schwarzwald
- Azimutbestimmungen in der Antarktis im Bereich der Neumayerstation zur Orientierung von Deformationsfiguren des Schelfeises (siehe Abb. 27).

Bei den Einsätzen in einigen Observatorien bestand oft die Schwierigkeit, dass die engen räumlichen Gegebenheiten das notwendige scharfe Fokussieren des Zielpunktes mit dem Theodolit wegen des Unterschreitens der kürzesten Zielweite nicht auf einfache Art möglich war. In diesen Fällen mussten oft Hilfskonstruktionen ad hoc installiert werden.

Schwierig und damit u. U. ungenau werden Kreismessungen dann, wenn sie im Freien bei ungünstigen Wetterbedingungen ausgeführt werden müssen. Ein Kreisel darf nicht Wind und Regen ausgesetzt werden. Es können Schirme oder gar ein Zelt notwendig sein, um befriedigende Messergebnisse zu erhalten. Und noch etwas ist beim Einsatz von Vermessungskreiseln zu beachten: die Messgenauigkeit ist abhängig von der geografischen Breite. Die Richtkraft des Kreisels variiert mit dem Kosinus der geografischen Breite, ist also am Äquator am höchsten und sie verschwindet an den Erdpolen.

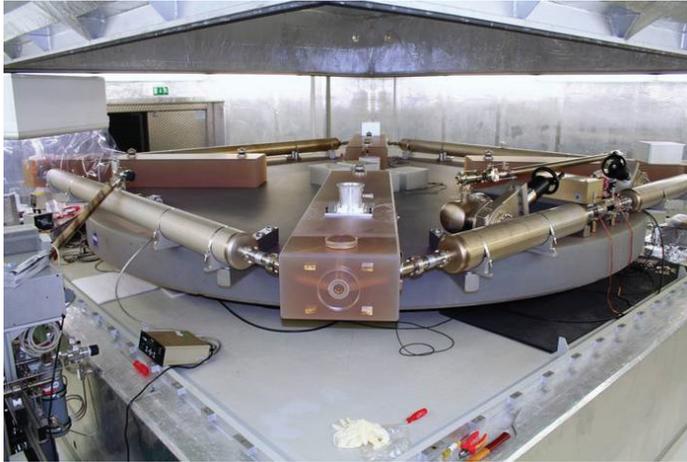


Abb. 28: Ringlaserkreisel in Wettzell.

4 Spezielle geodätisch relevante Kreisel

In der Praxis, insbesondere bei Großprojekten wie z. B. dem Eurotunnel, setzt man heutzutage ausschließlich automatische Kreisel ein. Ein bekannter Vertreter dieser Gattung ist der GYROMAT 3000 der Firma DMT. Mit diesem Kreisel kann man, nach Angaben in der Literatur, eine Genauigkeit von $\pm 3''$ für eine Azimutbestimmung erreichen. Neben der höheren Messgenauigkeit ist auch der geringere Zeitbedarf bei Messungen mit dem GYROMAT von Vorteil gegenüber manuell betriebenen Kreiseln. Aber diese Vorteile kosten viel Geld. Eine Universität kann sich ein solches Gerät nur für Übungszwecke oder gelegentliche Praxiseinsätze sicher nicht leisten. Eine Anschaffung wäre auch wegen der Automatisierung ("black box") aus didaktischen Gründen für das Verständnis der physikalischen Zusammenhänge bei der Kreiselorientierung nicht zu empfehlen.

Der technisch anspruchvollste geowissenschaftlich eingesetzte Kreisel ist der $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ große und 10 t schwere Ringlaserkreisel (siehe Abb. 28)¹. Er eröffnete die Möglichkeit, Variationen der Erddrehung zu erfassen. Dieser Ringlaser, auch Gyroskop genannt, wird in einem unterirdischen Labor auf der Fundamentalstation Wettzell in der Oberpfalz bei stabilen Druck- und Temperaturverhältnissen betrieben.

¹ <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/erde/vermessung-erdrotation/>

Forschung am Geodätischen Institut

Martin Breunig, Bernhard Heck und Maria Hennes

1 Lehrstuhl für Geoinformatik

Martin Breunig

1.1 Vorbemerkungen

Ein Überblick der aktuellen Forschungsinhalte am Lehrstuhl Geoinformatik wurde bereits an anderer Stelle dieser Festschrift gegeben. Hier sollen nun beispielhaft theorie- und praxisrelevante Forschungsinhalte aus der DFG-Forschergruppe "Rechnergestützte kooperative Trassenplanung in mehrskaligen 3D Stadt- und Bauwerksmodellen" herausgegriffen werden. Diese zeigen in typischer Weise die Rolle des Lehrstuhls am Geodätischen Institut als Drehscheibe für interdisziplinäre Kooperationen. Unter Leitung des Lehrstuhls Geoinformatik (Prof. Breunig) wird hier interdisziplinäre Forschung aus den Bereichen kooperatives Planen/Simulation (Prof. Rank, TU München), mehrskalige Modellierung (Prof. Borrmann, TU München), Geodatenbanken (Prof. Breunig, KIT), Geo-Web-Services (Prof. Schilcher und Prof. Kolbe, TU München) und mobile Vor-Ort-Visualisierung (Prof. Hinz, KIT) zusammengeführt. Die hier dargestellten Forschungsergebnisse und Abbildungen sind entnommen aus (Breunig u. a., 2017).

Die Planung von Infrastrukturmaßnahmen wie Straßen-, Bahn- und U-Bahntrassen im urbanen Umfeld und der damit verbundenen Über- und Unterführungsbauwerke stellt enorme Anforderungen an die beteiligten Ingenieure, da eine Vielzahl von rechtlichen, ökonomischen, ökologischen und konstruktiven Randbedingungen zu beachten sind. Gemeinsam ist diesen Anforderungen, dass sie einen Bezug zum geographischen Raum haben und damit als Geodaten einbezogen werden müssen. Gleichzeitig ist die Planung derartiger Maßnahmen durch eine hohe Zahl an Beteiligten, angefangen bei Planern aus unterschiedlichen Fachdisziplinen

über fachfremde Entscheidungsträger aus unterschiedlichen Ressorts bis hin zu Laien im Rahmen der Bürgerbeteiligung geprägt, die zudem i.d.R. räumlich verteilt arbeiten. Ein drei- bzw. vierdimensionales Stadt- und Bauwerksmodell (3D + Zeit), das nicht nur die vorhandenen Hochbauten, sondern ebenso die bereits vorhandenen unterirdischen Bauwerke und Infrastruktur (wie Tunnel, U-Bahnhöfe, aber auch Verrohrung, Leitungstrassen, Kanäle etc.) umfasst und die Möglichkeit bietet, geplante Infrastruktureinrichtungen in einfacher Weise zu integrieren, trägt zur Reduzierung der Komplexität der Planungsaufgabe bei und bildet damit eine deutlich geeignetere Grundlage für Planungsaktivitäten als die bislang in der Praxis meist verwendeten 2D-Pläne. Eine wesentliche Rolle spielt dabei auch die Integration von aktuellen Bilddaten während der verschiedenen Planungsphasen, um eine realitätsnahe Visualisierung des Planungsobjektes in seiner Umgebung, 3D-Analysen, Inspektionsaufgaben und ggf. eine Adaption der aktuellen Planung durchführen zu können – nicht nur im Büro, sondern auch vor Ort durch geeignete mobile Systeme.

Im Rahmen der Forschergruppe werden Methoden und Techniken zur kooperativen Planung von Infrastrukturbauwerken in 3D-Stadt- und Bauwerksmodellen erforscht und entwickelt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Planung von Bauwerken und Trassen. Dabei wirkt die 3D-Modellierung über eine Kollaborations-Plattform mit einer raum-zeitlichen Datenbank, Bilddaten und Geo-Web-Services zusammen. Letztere bilden gleichzeitig die Schnittstelle zum Planer vor Ort, der sich selbst sowie das 3D-Planungsmodell mittels eines mobilen, bildgestützten "Augmented Reality"-Systems lokalisieren kann. Zur Bewertung beispielsweise von Trassenführungen werden externe heterogene Geodatenquellen sowie GIS-Analysemethoden herangezogen, auf die über das Internet mittels Geo-Web-Services zugegriffen wird.

1.2 Systemarchitektur und Anwendungsfall

Um einen Überblick zu gewähren, soll zunächst die in der DFG-Forschergruppe entwickelte Software-Systemarchitektur dargestellt werden (Abb. 29).

Als Anwendungsszenario für die DFG-Forschergruppe dient die sog. Zweite Stammstrecke in München, die bis zum Jahr 2026 fertiggestellt sein soll. Sie ist das wichtigste Infrastrukturprojekt im Raum München und soll dazu dienen Engpassprobleme des öffentlichen Verkehrsnetzes zu lösen. Das Projekt wird auf 3,8 Milliarden Euro geschätzt. Die Zweite Stammstrecke besteht aus einem sieben Kilometer langen Tunnel, der die beiden wichtigsten innerstädtischen Bahnhöfe Hauptbahnhof und Ostbahnhof verbindet. Aufgrund der Vielzahl der bereits bestehenden U-Bahnlinien steht den Ingenieuren eine hochkomplexe Planungsaufgabe bevor, die in drei neuen Stationen endet, welche sich rund 40 Meter unter der Erde befinden.

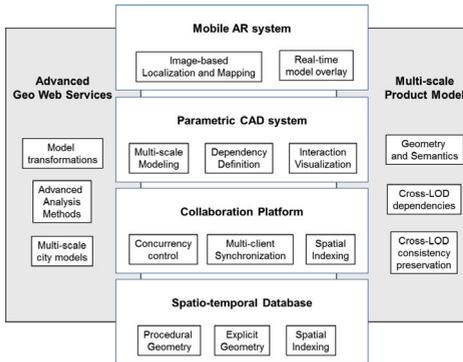


Abb. 29: Software-Systemarchitektur für die kollaborative Planungsumgebung, basierend auf einer multi-skaligen Modellierung.



Abb. 30: Teil der geplanten U-Bahn Trasse (LoD3 Modell).

Basierend auf den konventionellen 2D-Plänen der Projekttechniker wird prototypisch ein mehrskaliges Modell der Schild-Tunnel einschließlich der neuen Stationen und der Rettungsschächte entwickelt. Das Modell wird mit parametrischen CAD-Systemen erstellt, erweitert um Multi-Scale-Modellierungsfunktionen, die auf der Kollaborations-Plattform zur gleichzeitigen Bearbeitung bereitgestellt und in der raum-zeitlichen Datenbank gespeichert und indiziert werden. Das Modell wurde durch das 3D-Stadtmodell von München vervollständigt, das die Grundlage für die Multi-Modell-Analyse bildet, einschließlich der Erkennung von privaten und öffentlichen Gebäuden, die sich beispielsweise oberhalb des geplanten Tunnels befinden. Darüber hinaus bildete das Modell die Grundlage für das Testen der AR-Plattform (siehe Abb. 30).

Im Folgenden werden verschiedene Software-Komponenten zur Unterstützung der kollaborativen Trassenplanung vorgestellt.

1.3 Software-Komponenten für die kollaborative Trassenplanung

Kollaborations-Plattform mit integrierten Simulationen

Hauptbaustein für die kollaborative Planung ist eine Client-Server-basierte Plattform, die alle synchronen Zugriffe auf das zentral gespeicherte geometrische Modell verwaltet und steuert. Die Plattform führt die Mehrbenutzerkontrolle auf der Grundlage prozeduraler Modelle durch, sodass jede von den verschiedenen Benutzern vorgenommene Änderung niemals zu inkonsistenten Zuständen führt. Darüber hinaus unterstützt sie verschiedene Design-Tools wie Siemens NX[®] oder Autodesk Inventor[®] (siehe Abb. 31) und ermöglicht die Laufzeit-

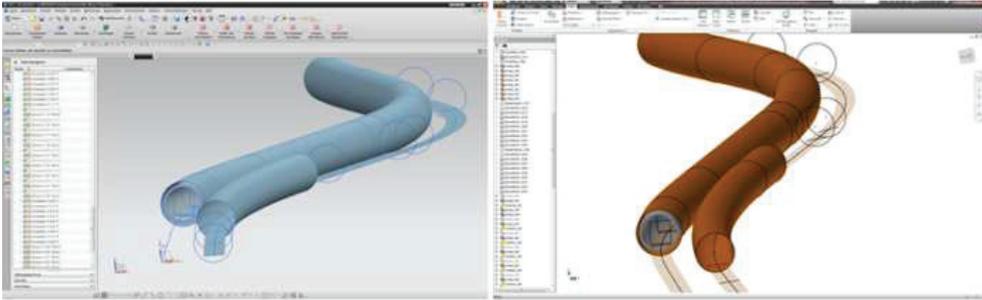


Abb. 31: Prozedurales Tunnelmodell, gleichzeitig repräsentiert mit zwei verschiedenen CAD Systemen.

Integration von Geo-Web-Services für erweiterte Abfragen wie Kollisionserkennung mit unterirdischen Teilen von Gebäuden.

Prozedurale Modelle speichern die Konstruktionsgeschichte, bestehend aus Skizzen und geometrischen oder booleschen Operationen.

Daher kann die Konstruktion eines beliebigen Objekts durch einen zweiteiligen Graphen beschrieben werden. Im Rahmen der Forschung wird dieses Diagramm für den Informationsaustausch zwischen Clients und Server verwendet, sowie für die Steuerung des gemeinsamen Zugriffs. Durch einen pessimistischen Ansatz verwendet die Kollaborations-Plattform Sperren für bestimmte Teile des Graphen, die zu diesem Zeitpunkt nicht von mehreren Benutzern manipuliert werden dürfen. Sobald ein Benutzer seine Änderungen beendet hat, werden die Sperren freigegeben, und endgültige Änderungen (d. h. die Operationen) werden an alle teilnehmenden Benutzer der kollaborativen Sitzung weitergegeben (siehe Abb. 32). Um die maximale Paral-

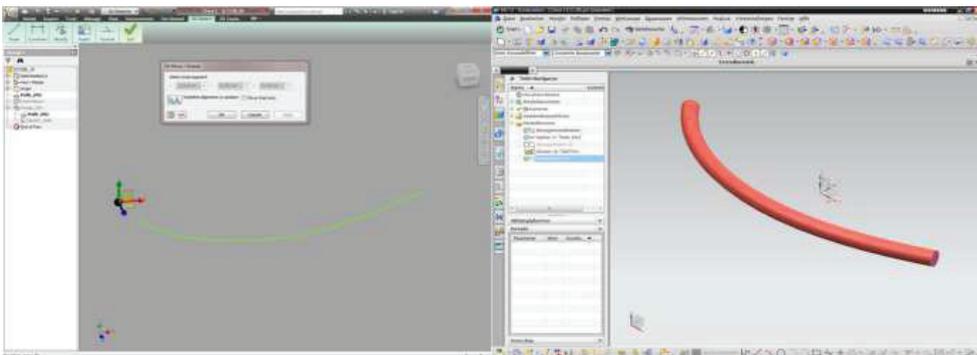


Abb. 32: Während der Modifikation: Sperren eines Elementes (links) und aller im Baum nachfolgenden (rechts) für alle Benutzer.

leilität zu unterstützen (das Sperren eines Teils in der Nähe der Baumwurzel sperrt auch alle nachfolgenden Teile), wurde ein Konzept entwickelt, das bei linearen Konstruktionen diese entlang der Längsachse in logische Unterstrukturen unterteilt.

Für einen ganzheitlichen Ansatz ist die Integration von Simulationsaufgaben in die Designphase vorteilhaft; daher können Engpässe bereits in frühen Phasen identifiziert werden. Dies wurde in der DFG-Forschergruppe prototypisch für zwei verschiedene Simulationswerkzeuge getestet – eine autonome Energiesimulation für den Energieverbrauch eines Zuges und eine Fußgängerfluss-Simulation für die Evakuierdynamik.

Multi-skalige Methoden für die Planung von Infrastruktur

Da die Planung von großen Infrastruktureinrichtungen wie innerstädtischen U-Bahn-Gleisen von der Kilometer-Skala bis zur Zentimeter-Skala sehr unterschiedliche Betrachtungsweisen erfordert, ist die Integration der multiskaligen Modellierung in Infrastruktur-Produktmodelle ein wichtiger Aspekt. Der Hauptvorteil von Multiskalenmodellen besteht darin, mehrere geometrische Darstellungen eines semantischen Objekts für jedes Level of Detail (LoD) zu definieren. Diese Repräsentationen werden dann u. a. verwendet, um die modellierten Gebäude oder Infrastruktureinrichtungen in verschiedenen Maßstäben zu visualisieren.

Wenn Abhängigkeiten zwischen den einzelnen LoDs nicht explizit definiert sind, können Inkonsistenzen auftreten. Es müssen daher Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Detailebenen bei der Erstellung des Multiskalenmodells definiert werden. Die Erzeugung erfolgt von oben nach unten, d. h. von der gröberen zur feineren Ebene, was die typische Planungsprozedur widerspiegelt.

Zur Entwicklung konsistenzbewahrender Produktmodelle wurden in der DFG-Forschergruppe fünf verschiedene LoDs zur Modellierung von Schild-Tunneln entwickelt. Abbildung 33 zeigt eine 3D-Darstellung der LoDs 2 bis 5. In LoD 1, der implizit in der Abbildung für LoD 2 mit dargestellt ist, ist der Tunnel geometrisch durch eine Kurve dargestellt, die die Hauptachse beschreibt. Für die Ebenen 2 bis 4 wird eine strikte Enthaltensein-Hierarchie verwendet: Die Räume auf einer feineren Ebene sind vollständig in dem von der gröberen Ebene bereitgestellten Raum enthalten. Im LoD 5 wird jedes physische Objekt in einen der Räume der gröberen LoDs platziert.

Einer der Schlüsselaspekte des Ansatzes besteht darin, dass die Verfeinerungshierarchie mit Hilfe von Raumobjekten erstellt wird, während physische Objekte nur einen Teil der feinsten Ebene bilden. Dies ermöglicht es, Räume als Platzhalter auf gröberen Ebenen zu verwenden

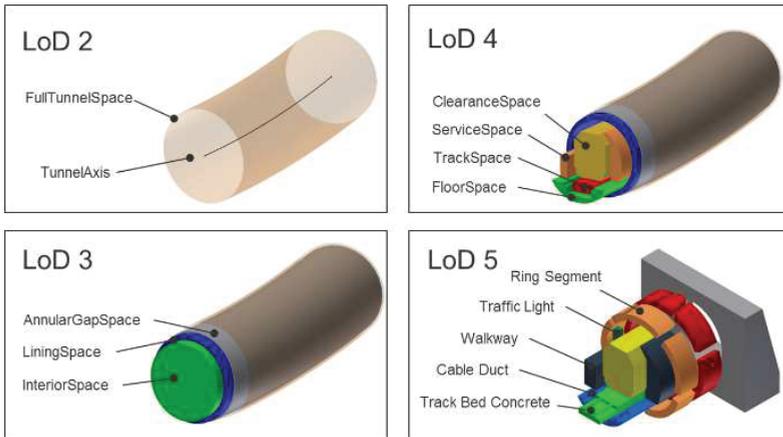


Abb. 33: Eine 3D Repräsentation verschiedener LoDs des multi-skaligen Schild-Tunnel Produkt Modells.

und somit die vollständige Übereinstimmung mit dem Standard-IFC-Modellierungsansatz für Raumelement-Aggregationsstrukturen zu erreichen.

Es wurde ein Konzept für die graph-basierte Darstellung von Produktmodellen und deren automatische Detaillierung entwickelt, indem auf Basis von formalen Regeln, die in einem Graph-Rewriting-System definiert sind, Operationen zum Umschreiben von Graphen ausgeführt werden. Es konzentriert sich auf das vorgestellte Produktmodell von Schild-Tunneln und die automatisierte Erstellung konsistenzbewahrender Multi-Scale-Versionen eines solchen Modells.

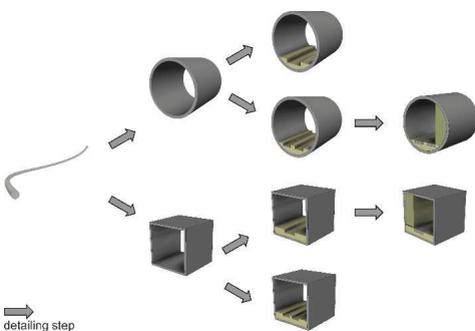


Abb. 34: Konzeptuelle Illustration einiger Stufen der Detailbildung in einem Tunnelplanungsprozess.

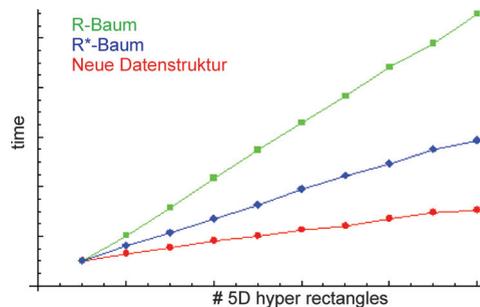


Abb. 35: Normalisierte Resultate für das Objekt-Retrieval von R-Baum, R*-Baum und der neuen Datenstruktur.

Das Modell wird dann schrittweise, wie in Abbildung 34 gezeigt, von dem Basis-Layout der Trassenlinie bis zu einem LoD detailliert, der mehrere Raumobjekte des Tunnels enthält.

Mit der Definition eines Graph-Metamodells ermöglicht der Ansatz die Darstellung und Speicherung parametrischer prozeduraler Modelle einschließlich seiner Konstruktionsgeschichte unter Verwendung eines anbieterneutralen graph-basierten Datenformats. Die vorgeschlagene Methode ist generisch und kann verschiedene parametrische CAD-Systeme, die zum Generieren eines ausgewerteten Modells durch Interpretation der graph-basierten Darstellung verwendet werden, problemlos unterstützen. Ein wichtiges Merkmal der Methode ist außerdem die Möglichkeit, das ausgewertete Modell so zu modifizieren, dass es als Grundlage für weitere Modellierungsoperationen im jeweiligen CAD-System dienen kann.

Raum-zeitliche Datenbank und hybride räumliche Datenhaltung

Um den effizienten raum-zeitlichen Datenzugriff auf Infrastrukturen während der Planung und des Baufortschritts zu ermöglichen, ist es im Allgemeinen erforderlich, dass die sekundäre Speicherzugriffsmethode des Geodatenbank-Managementsystems drei räumliche und zwei zeitliche Dimensionen berücksichtigt: Bauzeit und Planungszeit. Diese zwei zeitlichen Dimensionen entsprechen in etwa den Begriffen der Echtzeit- bzw. Transaktionszeit, die in der Datenbankforschung verwendet werden.

Im hier betrachteten Ansatz der DFG-Forschergruppe werden zwei k-d-b-Bäume verwendet, d. h. jedes begrenzende Hyperrechteck eines Objekts ist in einen unteren und einen oberen Grenzpunkt unterteilt, um in zwei parallel arbeitenden Teilbäumen gespeichert zu werden. Jeder Unterbaum speichert dann 5-dimensionale Punkte und jeder Punkt enthält einen Zeiger auf das entsprechende begrenzende Hyperrechteck. Während der Datenbankabfragen geben

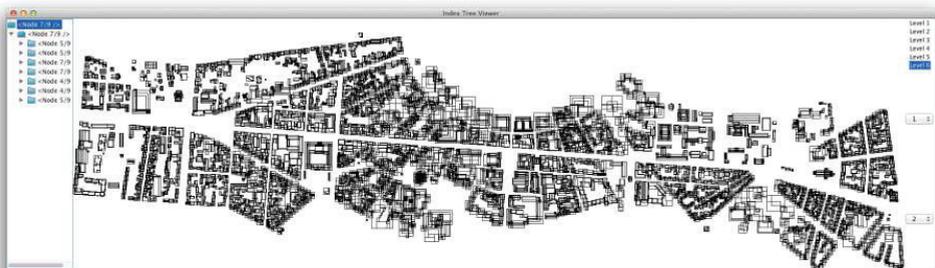


Abb. 36: Datensatz für die Validierung: Teil des Karlsruher Stadtmodells.

beide Unterbäume Ergebnisse an dieselbe Ergebnismenge zurück. Zur Validierung des Ansatzes wurden reale Datensätze der Stadtmodelle aus Karlsruhe bzw. München verwendet (siehe Abb. 36).

Im Vergleich dieses Ansatzes mit traditionellen mehrdimensionalen Zugriffsmethoden wie dem R-Baum und dem R*-Baum zeigt sich eine deutliche Überlegenheit bei raum-zeitlichen Anfragen. Abb. 35 zeigt die Beziehung zwischen der Anzahl der 5D-Hyperrechtecke (3 räumliche und 2 zeitliche Dimensionen) und der Zeit, die für die Suche im R-Baum, R*-Baum und der neuen Datenstruktur benötigt wird.

Die Datenhaltung der 5D-Hyperrechtecke wurde direkt auf dem objektorientierten Datenbankmanagementsystem db4o[®] implementiert. Die neue Struktur übertrifft den R-Tree und auch den R*-Tree in der Laufzeit deutlich.

Neben der effizienten Verwaltung raum-zeitlicher Daten wurden in der DFG-Forschergruppe auch Lösungen für die Verwaltung hybrider räumlicher Modelle in einer Geodatenbank vorangetrieben. Neben der expliziten Geometrie, wie z. B. triangulierten Oberflächen, müssen auch die von einem CAD-System konstruierten Geometrien, d. h. das prozedurale Modell, berücksichtigt werden. Um das logische Modell in einer Datenbank zu repräsentieren, wurde auf einen XML-orientierten Ansatz zurückgegriffen; dies ermöglicht es die Logik des Konstruktiven Geometrischen Baums (CSG-Baum) in die Datenbank abzubilden.

Es wurde ein gemeinsames Zugriffsmodul bzw. Abfragemodul entworfen, um die verschiedenen Modelldarstellungen zu behandeln: Das prozedurale Modell (PM), das semantische Modell (SM), das explizite Modell (EM) und das Annotationsmodell (AM) werden integriert verwaltet (siehe Abb. 37) und sind über Geo-Web-Services zugreifbar.

Aus der Betrachtung der Vorgehensweise bei der Konstruktion der Trassen-Daten folgen starke Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Repräsentationen. Insbesondere ist das EM vollständig vom PM und SM abhängig, und es gibt keine Rückkopplung vom EM zum PM. Folglich müssen alle Aktualisierungen des Datensatzes zuerst auf dem SM und PM stattfinden und dann zum EM übertragen werden.

Um das Konzept zu überprüfen, d. h. einige typische Aspekte des oben gezeigten Konzepts zu implementieren, entschieden wir uns nach einigen Experimenten mit der XML-Datenbank, Methoden des objektrelationalen Geodatenbankverwaltungssystems PostGIS / PostgreSQL zu verwenden. Es ist zu beachten, dass bei diesem eingeschränkten Ansatz alle CSG-Operationen wie "Schnittmenge" etc. auf der gleichen Ebene des CSG-Baums ausgeführt werden müssen. Attribute können selektiert und in einer Relation der Geo-Datenbank gespeichert wer-

den. Die Geo-Datenbank wird eher als Datenarchiv denn als Software zum Ausführen von Online-Updates verwendet. Bezüglich der Daten enthält das spezielle Format "IFC / Step" die vollständige Konstruktionsregel, z. B. den äußere Rumpf eines Tunnels als prozedurales Modell. Die hier vorgestellten Implementierungen des prozeduralen und semantischen Modells basieren auf XML. Die Mapping-Strategie wird in zwei Schritten ausgeführt: Zuerst wird das XML-Schema dem Objektschema und dann das Objektschema dem Datenbankschema zugeordnet. Für das hybride Modell muss dies sowohl für das prozedurale als auch für das semantische Modell durchgeführt werden.

Um den zeitlichen Aspekt zu berücksichtigen, werden Tabellen für das Versionsmanagement benötigt. Diese Tabellen enthalten auch die Beziehungen zwischen den Datensätzen der verschiedenen Modelle. Zum Beispiel wird berücksichtigt, welches importierte semantische Modell zu welchem importierten prozeduralen Modell gehört. Ein weiterer Vorteil des Versionsmanagements besteht darin, dass die Unterschiede zwischen zwei Zeitschritten oder einem Zeitraum angezeigt werden können.

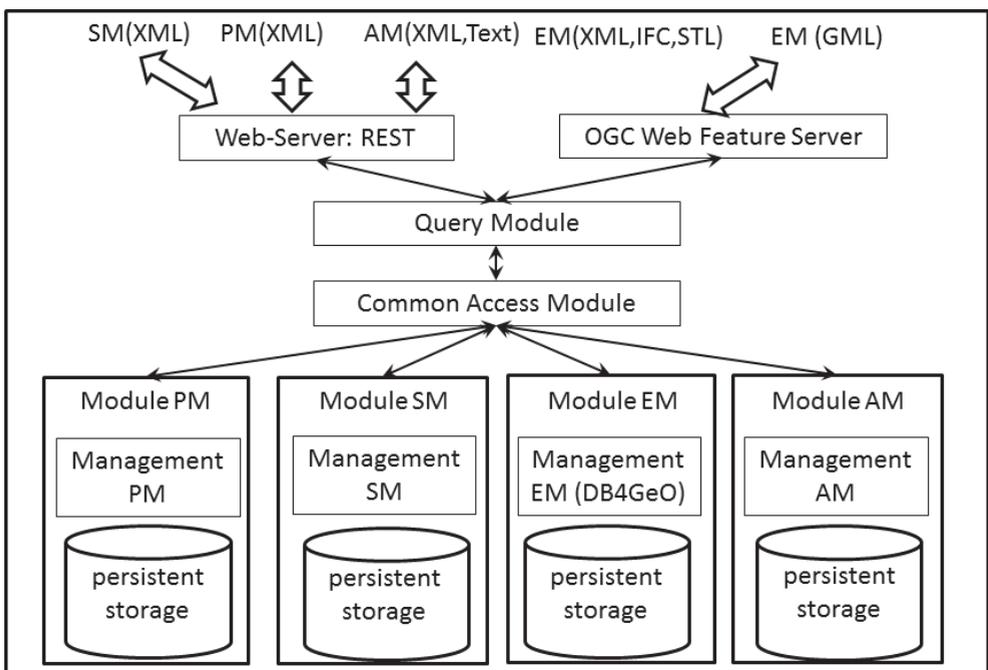


Abb. 37: Architektur einer hybriden raum-zeitlichen Datenbank. Jede Modelldarstellung wird in einem separaten Datenbankmodul gespeichert (PM: prozedural, SM: semantisch, EM: explizit, AM: Annotation). Der integrierte Zugriff erfolgt über ein gemeinsames Zugriffsmodul.

Um die Datenbank für das hybride räumliche Modell zu vervollständigen, muss das Schema des expliziten Modells hinzugefügt werden. Insbesondere zur Speicherung des expliziten Modells ist es sinnvoll, dieses als objektorientiertes Modell zu realisieren. Im beschriebenen Anwendungsfall wird ein Objekt durch eine Konstruktionskomponente eines Tunnels definiert, die durch eine Sweep-Operation erzeugt werden kann. Diese Definition impliziert auch, welche Teilbäume der XML-Dokumente zu einem Objekt des expliziten Modells gehören. Mit der Definition eines Objekts können die Beziehungen zwischen verschiedenen Modellen auf der Ebene einzelner Objekte verknüpft werden. Die Verknüpfungen zwischen Objekten sind wichtig, um Abfragen zu definieren, indem Objekte als Eingabe für die Abfragen verwendet werden. Räumliche Abfragen, die für das prozedurale Modell abgerufen werden, sind typische Beispiele für Abfragen, die die oben genannten Beziehungen definitiv benötigen. Darüber hinaus können Teilmengen des prozeduralen und des semantischen Modells mit den Verknüpfungen auf der Ebene von Objekten erzeugt werden.

Die Tunnel-Teil-Objekte des expliziten Modells werden als Körper (Solids) in der Datenbank gespeichert. Zum Speichern von Solids in der Datenbank wurde die Erweiterung SFCGAL von PostGIS verwendet. Diese Erweiterung ermöglicht die Verwendung von CSG-Operationen und räumlichen Indizes für die Daten. Mit den CSG-Operationen ist es auch möglich, die verschiedenen Detailebenen eines Tunnels in der Datenbank zu generieren. Zu diesem Zweck werden die grundlegenden Festkörper des Tunnels und ein Übersetzer für den Konstruktionszyklus des prozeduralen Modells benötigt.

Die Prototyp-Implementierung zeigt, dass die Herausforderungen durch Anpassung einer existierenden objekt-relationalen Datenbank gelöst werden können, um ein semantisches, prozedurales und explizites Modell in einer Datenbank zu kombinieren.

1.4 Erweiterte Geo-Web-Dienste

Die Integration von Entwurfsvorschlägen in eine virtuelle Darstellung ihres geografischen Kontexts wird durch die Kapselung von Geodaten und Analysefunktionen in Geo-Web-Services erreicht. Auf diese können die Klienten der Kollaborations-Plattform, z. B. 3D-Modellierungswerkzeuge, zugreifen. Aufgrund der großen Anzahl von Stakeholdern, die an Infrastrukturplanungsprojekten beteiligt sind, ist das Datenmanagement eine komplexe Aufgabe. Um diese Aufgabe zu unterstützen, wurde das konzeptuelle Schema eines Geodaten-Web-Service-Kontextdokuments entwickelt, das es ermöglicht, die individuellen Informationsbedürfnisse der Stakeholder zu beschreiben, d. h. eine bestimmte Kombination von Daten und Funktionalität, die von Geo-Web-Services auf eine formale Weise bereitgestellt wird.

Das entwickelte objektorientierte Schema ermöglicht die Darstellung der folgenden Aspekte benutzerspezifischer Informationsbedürfnisse: Benutzergruppenspezifische Regeln für das Filtern spezifischer Objekte, Layers und feinkörnigere Datenanforderungen einschließlich der Spezifikation von Detailebenen (Level of detail).

1.5 Augmented Reality System

Um mit AR-Sensoren ohne GNSS-Signale zu navigieren und zu tracken, wurde ein bildbasiertes Tracking-Schema in Analogie zu typischen SLAM-Ansätzen (Simultaneous Localization and Tracking) entwickelt. Dieses System basiert auf einer Multi-Fisheye-Kamera und unterstützt auch eine (CAD-) modellbasierte Tracking-Komponente, um auch komplexe Umgebungen zu bewältigen. Außerdem wurde das Problem angegangen, die Position des ursprünglichen AR-Systems ohne Hilfe anderer Sensoren zu schätzen.

Das AR-System verwendet ein Multi-Kamera-System (MCS), das aus drei Kameras mit Fisheye-Objektiven besteht, die auf dem Helm des Operators angebracht sind. Die Bilder des MCS dienen zur initialen und kontinuierlichen Echtzeit-Posen-Schätzung und Selbstlokalisierung innerhalb des 3D-Gebäudemodells mit bildbasierten Methoden. Für die Arbeit mit starr gekoppelten Kameras wurde ein neuer Ansatz für gängige kollineare Gleichungen für Mehrkamarasysteme entwickelt. Für die Kalibrierung des MCS wurde eine generische Methodik für Weitwinkel-, Fischaugen- und omnidirektionale Kameras implementiert. Dies führte zu einer verbesserten Genauigkeit im Vergleich zu früheren Untersuchungen. Nach der Kalibrierung sind die Parameter für die Welt-zu-Kamera Projektion und die gegenseitigen Transformationen innerhalb des MCS bekannt. Durch die Analyse der Bildsequenzen aller Kameras des MCS in Echtzeit kann das Helmsystem den Standort des Benutzers in der Szene schätzen und verfolgen.

Der erste Schritt der kamerabasierten Tracking-Methode ist die Initialisierung des Systems durch Selbstlokalisierung innerhalb der Szene. Zwei verschiedene Lokalisierungsmethoden wurden entwickelt. Die erste ist die Neulokalisierung des MCS entweder nach einem Tracking Verlust oder wenn die Systeme einen Ort erneut besuchen, der während des Trackingvorgangs in Echtzeit zugeordnet wurde, was durch ein sogenanntes Co-Sichtbarkeitsdiagramm erfolgen kann. Die zweite ist eine Selbstlokalisierungsmethode, die das unstrukturierte 3D-Gebäudemodell verwendet.

Durch Vergleichen von Merkmalen aus realen und synthetischen Ansichten der Umgebung ist das System in der Lage, seine Pose in dem Gebäudemodell zu schätzen, entweder unter

Verwendung von angenähertem Nächster-Nachbar-Abgleich oder Partikelfilterung. Diese beiden Anforderungen – einerseits Wiedererkennungsszenen mit Hilfe einer verbesserten Online-Lernmethode für binäre Merkmale (sog. *MdBrief*) zu erkennen und andererseits die anfängliche Sensorposition in einem strukturlosen Modell zu finden – führte zur Entwicklung eines modellgestützten Multi-Kamera-SLAM-Systems namens "MultiCol-SLAM". Der modellgestützte Teil wird auch zur Korrektur der Drift des SLAM-Systems verwendet.

Die Hauptidee ist das Rendern einer Ansicht des 3D-Modells, alle sichtbaren Kanten daraus zu extrahieren und sie mit dem realen Kamerabild der Szene innerhalb dieses Modells zu vergleichen. Mit Hilfe der Formulierung der kollinearen Gleichungen ist es möglich, diese Ansichten des 3D-Gebäudemodells in die Bilder des Fischauges zu übertragen. Die Pose (absolute Orientierung) der Kameras muss bekannt sein, um eine solche Ansicht zu ermöglichen. Das Problem der anfänglich unbekannt Pose wird gelöst, indem viele Stichprobenansichten innerhalb des Modells in einem Offline-Prozess berechnet werden, eindimensionale Feature Vektoren für jede Ansicht extrahiert werden und die beste Übereinstimmung im Vergleich zu den Kamerabildern gefunden wird.

Abbildung 38 zeigt drei Trajektorien, die zur besseren Auswertung in das Gebäudemodell transformiert wurden. Die grüne Trajektorie basiert auf kombiniertem Tracking mit der modellgestützten Methode und die rote Trajektorie repräsentiert das Ergebnis von MultiCol-SLAM ohne Modellunterstützung.

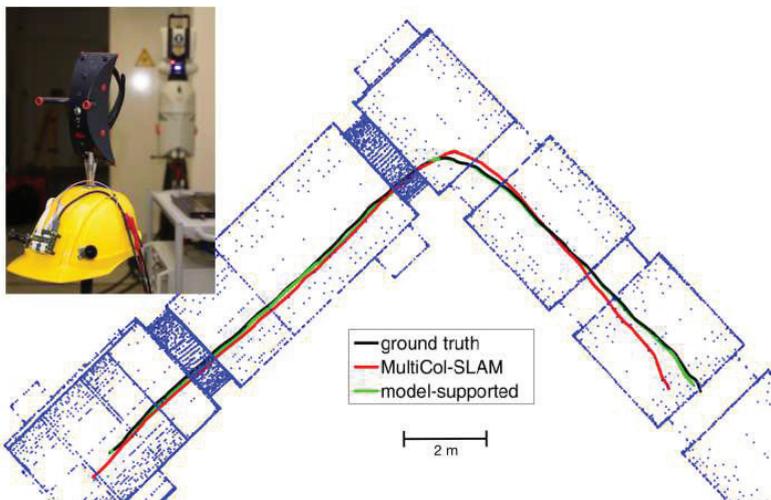


Abb. 38: Tracking-Auswertung mit auf das Gebäudemodell transformierten Trajektorien. Die Ground Truth-Trajektorie (schwarz) wurde mit einem Laser-Tracker erfasst (siehe Tracker-Sonde am Helm).

1.6 Fazit

Die Planung von Infrastrukturmaßnahmen in Innenstadtbereichen ist eine äußerst komplexe Aufgabe, die bislang nahezu ausschließlich auf der Basis von 2D-Planungsunterlagen realisiert wird, was einerseits Abstraktionsvermögen und entsprechende Erfahrung der Planenden voraussetzt, andererseits aber selbst bei erfahrenen Planern zu Fehlern führt, die oft auf unvollständige Informationen, mangelnde Abstimmung mit anderen Beteiligten oder falsche Interpretation nicht eindeutiger Datenbestände zurückzuführen sind. Eines der Hauptziele der DFG-Forschergruppe ist es daher, die enormen Potenziale einer konsequent 3D-basierten Planung sowie Möglichkeiten zu ihrer technischen Umsetzung aufzuzeigen. Aufgrund des großen Interesses aus der Praxis werden die Forschungsarbeiten der DFG-Forschergruppe u. a. von der OBERMEYER Planen + Beraten GmbH in München begleitet.

2 Lehrstuhl für Physikalische und Satellitengeodäsie

Bernhard Heck

2.1 Vorbemerkungen

Wie bereits im Beitrag „Das Geodätische Institut (1993 - 2018)“ (Abschnitt 3.3) deutlich wurde, erstrecken sich die wissenschaftlichen Tätigkeiten am Lehrstuhl "Physikalische und Satellitengeodäsie" primär über drei Schwerpunkte.

Ein erster Themenbereich umfasst Arbeiten zur Modellierung des Schwerefeldes der Erde und dessen Bestimmung aus terrestrischen und satellitengestützten Verfahren. Die der gravimetrischen Bestimmung des Quasigeoids zugrundeliegende Theorie von Molodensky enthält eine Reihe von Approximationen, deren Einfluss abgeschätzt wurde; durch zusätzlich eingeführte Reduktionsterme konnten die Approximationsfehler stark reduziert und die Theorie an die aktuellen Genauigkeitsanforderungen angepasst werden. Anwendungen dieser methodischen Weiterentwicklungen ergaben sich einerseits bei der Berechnung eines hochgenauen Quasigeoids für Baden-Württemberg, andererseits bei Studien zur Bestimmung einer globalen Höhenreferenzfläche und zur Vereinigung von Landeshöhensystemen zu einem einheitlichen Welthöhensystem. Eine mehr technisch-numerische Frage betrifft die Modellierung topographisch-isostatischer Massen und deren Auswirkungen auf die Funktionale des Schwerefeldes (Potential, Schwere, Schweregradienten). Wegen der unregelmäßigen Form der Topographie sind diese Berechnungen – auch bei Verwendung moderner Parallelrechner –

numerisch sehr aufwändig. Die am GIK begründete und optimierte Tesseroidmethode führt zu einer erheblichen Reduktion des Rechenaufwands und wird inzwischen weltweit von vielen Arbeitsgruppen eingesetzt.

Den zweiten Themenbereich bilden methodisch ausgerichtete Arbeiten zur Verbesserung der Modellbildung bei der Auswertung von GNSS-Phasenbeobachtungen und zur Verminderung spezifischer Fehlereinflüsse. Hierzu zählen insbesondere Ungenauigkeiten in der Antennenkalibrierung und Mehrwegeinflüsse, die wegen der Wiederholung der GPS-Satellitenkonfiguration mit Tagesperiode durch spezielle Stacking-Verfahren stark reduziert werden können. Während das funktionale Modell bei der Auswertung von GNSS-Beobachtungen recht ausgereift ist, gibt es immer noch Defizite im stochastischen Modell: In der Regel werden die Beobachtungen als unabhängig und gleich genau, gegebenenfalls von der Elevation abhängig betrachtet, sodass die zugehörige Gewichtsmatrix eine Diagonalform besitzt, was zu einer deutlich zu optimistischen Schätzung der Genauigkeitsmaße führt. Bei Berücksichtigung physikalischer Korrelationen entsteht ein realitätsnäheres stochastisches Modell, jedoch auch eine vollbesetzte Kovarianzmatrix. In verschiedenen am GIK durchgeführten Untersuchungen zur Verbesserung des stochastischen GNSS-Modells konnten signifikante Auswirkungen auf die geschätzten Parameter sowie die Genauigkeitsmaße festgestellt werden. Weitere Studien sind der Bestimmung räumlich-zeitlicher Wasserdampffelder gewidmet; während der Wasserdampf für Positionsbestimmungen eine Störgröße darstellt, können aus GNSS-Beobachtungen wertvolle Informationen über die Wasserdampfverteilung für Anwendungen in der Meteorologie extrahiert werden. Testdaten für Untersuchungen dieser Art liegen im tri-nationalen Gebiet des Oberrheingrabens aus dem internationalen GURN-Projekt (GNSS Upper Rhine Graben Network) in großem Umfang vor.

Forschungsarbeiten zur Bestimmung von Bodenbewegungen und Deformationen aus verschiedenen geodätischen Beobachtungsverfahren sind dem dritten Themenbereich "Rezente Geodynamik" zugeordnet. Durch Kombination von wiederholten Präzisionsnivellements der Landesvermessungen, GNSS-Daten aus dem GURN-Netz und SAR-Daten verschiedener Radar-Satelliten konnten die Vorteile der jeweiligen Messverfahren genutzt und die großräumigen, durch tektonische und anthropogene Einwirkungen hervorgerufenen Bodenbewegungen im Bereich des Oberrheingrabens und angrenzender Gebiete mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Methodische Arbeiten betrafen Verbesserungen bei der Auswertung von SAR-Daten nach dem interferometrischen Persistent-Scatterer-Verfahren (PS-InSAR) im Hinblick auf urbane Umgebungen und auf großräumige Anwendungen. Mit einem anderen Ansatz auf der Grundlage der deutschen Satellitenmission TerraSAR-X war es möglich Deformationen und Massenflüsse an verschiedenen Vulkanen zu ermitteln. In verschiedenen von der Industrie und

Ministerien unterstützten Projekten konnte die Leistungsfähigkeit der angewandten Algorithmen und Software eindrucksvoll demonstriert werden. InSAR-Verfahren, ggf. in Kombination mit GNSS, besitzen ein hohes Potential für die Überwachung von Bewegungen und Deformationen der Erdoberfläche und den Aufbau eines nationalen Bodenbewegungskatasters. Im dritten Themenbereich sind auch die Arbeiten am Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsobservatorium des KIT und der Universität Stuttgart (BFO Black Forest Observatory) angesiedelt, über die im Beitrag „Das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach (BFO)“ ab Seite 255 berichtet wird.

Im Folgenden werden einige dieser Forschungsarbeiten, die überwiegend von der DFG, der EU, dem DAAD und verschiedenen Ministerien finanziell unterstützt wurden und großenteils in internationale Programme und Studiengruppen eingebunden waren und sind, im Detail dargestellt; über praktische Anwendungen und Auftragsarbeiten wird im Kapitel „Innovationen am Geodätischen Institut“ (Abschnitt 3 „Lehrstuhl für Physikalische und Satellitengeodäsie“) berichtet. Die sehr starke interdisziplinäre Vernetzung innerhalb der Geowissenschaften (Geophysik, Geologie, Meteorologie) und internationale Zusammenarbeit (bisher mit Partnern in Frankreich, Niederlande, Ungarn, Ägypten, China, Australien, Kanada, Brasilien und Chile) waren ein besonderes Charakteristikum der wissenschaftlichen Arbeiten am Lehrstuhl "Physikalische und Satellitengeodäsie" und werden auch künftig für die neu ausgerichtete Professur "Geodätische Erdsystemwissenschaft" mit dem Fokus auf das neue Arbeitsgebiet "Environmental Geodesy" im Zusammenhang mit dem globalen Wandel eine wesentliche Rolle spielen.

2.2 Afrikanisches Geoid

Die Bestimmung einer kontinentalen Höhenreferenzfläche für Afrika, des afrikanischen Geoids, ist Ziel der Sub-Commission 2.4d der Internationalen Assoziation der Geodäsie. Mit den für die gravimetrische Geoidberechnung erforderlichen technischen Arbeiten befasst sich eine internationale Arbeitsgruppe unter der Leitung von Prof. Dr. Hussein Abd-Elmotaal (Minia University, Minia/Ägypten) und Beteiligung des GIK, deren erste Aufgabe die Kompilierung und Homogenisierung der im Bereich von Afrika verfügbaren gravimetrischen (vergl. Abb. 39) und topographischen Daten ist. Ein erstes Zwischenergebnis war die gravimetrische Datenbasis AFRGDB_V1.0 (Abd-Elmotaal u. a., 2016b, 2018b), die aus der Analyse von gravimetrischen Messungen im Land- und Meeresbereich sowie aus Ergebnissen der Satellitenaltimetrie gewonnen wurde. Herausforderungen bei der Kombination der verschiedenen Datenquellen bestehen einerseits in groben Fehlern in den schiffsgravimetrischen Daten, andererseits in

einer unzureichenden Überdeckung des afrikanischen Kontinents mit Schweremessungen. Die Lücken im terrestrischen Schwerematerial wurden mit Hilfe eines an die afrikanischen Daten angepassten Referenzschwerefeldes (Abd-Elmotaal u. a., 2016a) unter Nutzung des EGM2008-Modells (Pavlis u. a., 2012) und unter Anwendung eines isostatischen Modells geschlossen. Die resultierende Datenbasis AFRGDB_V1.0 besteht aus einem regelmäßigen Gitter von Schwereanomalien mit einer Auflösung von $5' \times 5'$ im Breitenbereich $42^\circ \text{nB} \geq \varphi \geq 40^\circ \text{sB}$ und im Längensbereich $20^\circ \text{wL} \leq \lambda \leq 20^\circ \text{öL}$. Unter Nutzung weiterer Datenquellen, Verwendung des neuen GOCE Dir_R5-Modells als Referenzfeld und unter Anwendung innovativer Interpolationsmethoden wurde die Datenbasis AFRGDB_V2.0 erstellt (Abd-Elmotaal u. a., 2018a). Eine Validierung der interpolierten Schwereanomalien auf Basis von Daten, die bei der Interpolation nicht benutzt wurden, ergibt eine innere Genauigkeit von ca. 5,5 mGal und eine äußere Genauigkeit von ca. 7 mGal.

Die vom DAAD geförderten Arbeiten zum afrikanischen Geoid werden fortgesetzt.

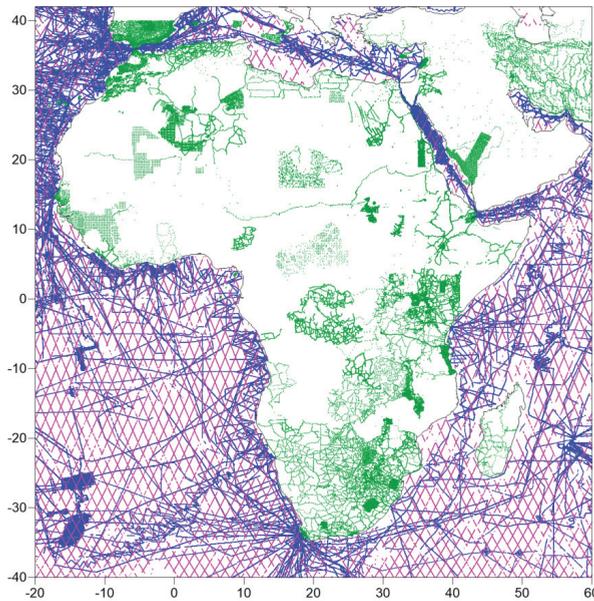


Abb. 39: Verteilung der Freiluftanomalien im Bereich von Afrika. Schiffsgravimetrische Daten in Blau, Altimeterdaten in Rot und Schweremesspunkte an Land in Grün.

2.3 Globales vertikales Datum und Vereinheitlichung regionaler Höhensysteme

Während nationale Höhensysteme an unterschiedliche Meerespiegel angeheftet und somit zueinander inkonsistent sind, erfordern die Aufgaben der modernen Geodäsie die Schaffung einer einheitlichen, zentimetergenauen, globalen Höhenreferenzfläche. Zur Lösung dieser Aufgabe können prinzipiell die Ergebnisse der Schwerefeldmissionen GRACE und GOCE verwendet werden, die jedoch nicht die notwendige Auflösung im kurzwelligen Bereich des Schwerefeldes besitzen. Um eine Verbindung zwischen verschiedenen kontinentalen Höhensystemen herstellen und ein globales vertikales Datum realisieren zu können, sind zusätzliche Informationen über die hochfrequenten Komponenten im Schwerefeld erforderlich. In dem von der DFG in den Jahren 2012 - 2016 geförderten Forschungsprojekt (He1433/20-1/2) wurden zwei verschiedene Wege zur Lösung dieser Problematik untersucht.

Die erste Methode besteht in der Verwendung hochauflösender digitaler Geländemodelle (DGM), aus denen unter gewissen Dichteannahmen die Wirkungen auf das Schwerefeld berechnet werden (Grombein u. a., 2016; Grombein, 2017a,b). Im Rahmen des Projekts wurde auf der Basis einer Darstellung der Topographie durch Tesseroide das bis Grad und Ordnung 2190 vollständige Schwerefeldmodell RWI_TOPO_2015 berechnet, mit dem die Auflösung der GOCE/GRACE-Modelle erheblich gesteigert und der Abbruchfehler in Gebirgsgebieten stark verringert werden konnte (siehe Abb. 40). Dieses Modell ist unter http://www.gik.kit.edu/rwi_model.php bzw. von der ICGEM-WEB-Seite http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_reltopo verfügbar.

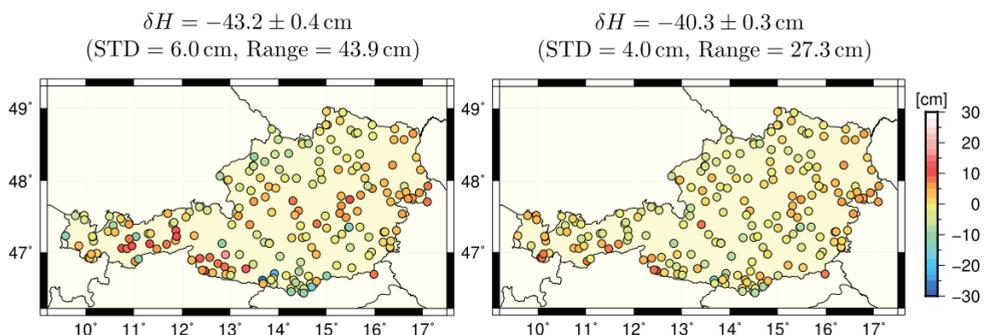


Abb. 40: Ausgeglichene Residuen an 198 GNSS/Nivellementsunkten in Österreich (Quelle: BEV). Links sind die Ergebnisse ohne Berücksichtigung von hochfrequenten topographischen Effekten, rechts die Resultate mit Berücksichtigung dieser Effekte dargestellt. Zudem sind der jeweils geschätzte Höhenoffset δH und die Standardabweichungen (STD) und Spannweiten (Range) der Residuen angegeben.

Die zweite Methode geht von der Nutzung terrestrischer Schweredaten aus, deren Verwendung auf ein um Bias-Terme erweitertes Geodätisches Randwertproblems (GRWP) führt; der untersuchte innovative Ansatz beruht auf der Formulierung eines fixen GRWP. Eine Simulation, mit der die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens analysiert wurde, führte zu ermutigenden Ergebnissen (Grombein u. a., 2016).

2.4 Quantifizierung von Volumenänderungen aktiver Vulkane mittels bistatischer TanDEM-X SAR-Interferometrie

Die Bestimmung des Volumens von eruptiertem Material während vulkanischer Aktivitätsphasen ist einerseits für die Einschätzung der Gefährdung der ansässigen Bevölkerung von immenser Bedeutung, andererseits eine große Herausforderung in der Vulkanforschung. Dies gilt insbesondere für dombildende Vulkane (Abb. 41), die weltweit zu den gefährlichsten geologischen Objekten gehören. Eine Möglichkeit zur Ermittlung der Menge des ausgestoßenen Materials beruht auf dem Vergleich von Geländemodellen des Vulkans vor, während und nach einer Eruption. Klassische Methoden zur Bestimmung digitaler Geländemodelle (DGM) mit Hilfe geodätischer Vermessung, photogrammetrischer Verfahren oder interferometrischer Auswertung von Radarbildern (InSAR) sind hierfür in der Regel nicht anwendbar,



Abb. 41: Der Gipfel des Vulkans Colima (Mexiko) im November 2012. Deutlich erkennbar ist der innerhalb eines Kraterrandes angewachsene Lavadom. Foto: J. Kubanek.

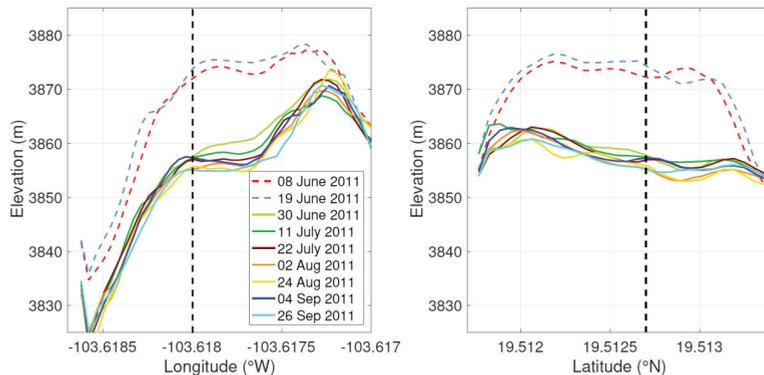


Abb. 42: Querschnitte durch das Digitale Oberflächenmodell des Vulkans Colima. Links: West-Ost Profil auf der Breite 19,51270° N. Rechts: Süd-Nord-Profil auf der Länge 103,61800° W. Die gestrichelte schwarze Linie kennzeichnet den Kreuzungspunkt beider Profile. Durch eine kleinere Explosion am 21.06.2011 stürzte ein Teil des Lavadoms ein, wodurch sich die Höhe des Vulkangebäudes um ca. –20m reduzierte. Die Änderung des Domvolumens beträgt $(0.189 \pm 0.027) \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Kubanek u. a., 2018).

da einerseits das Gelände oft unzugänglich oder wegen Gas- und Aschewolken für optische Messungen nicht einsehbar ist, andererseits die Kohärenz der Radarbilder aufgrund starker Oberflächenveränderungen nicht gewährleistet ist.

In dem vom BMWi geförderten Projekt „Quantifizierung magmatischer Förderraten und Überwachung der Stabilität aktiver Vulkandome mittels differentieller digitaler Elevationsmodelle (DDEM)“ wurde das Potential bistatischer TanDEM-X-Aufnahmen zur Erstellung von hochauflösenden DGMs an aktiven Vulkanen ausgelotet. Die Satellitenmission TanDEM-X überwindet einige Einschränkungen der klassischen monostatischen Interferometrie, bei der Radarbilder miteinander verglichen werden, die mit einem zeitlichen Abstand von Tagen oder Wochen aufgezeichnet wurden. TanDEM-X besteht aus einer Formation von zwei nahezu identischen Satelliten, die simultan zwei Radarbilder aus leicht unterschiedlicher Position aufzeichnet. Im Gegensatz zu monostatischen Aufnahmen kann mit diesem *bistatischen* Aufnahmemodus aus jedem einzelnen Überflug des Satellitenpaares ein DGM berechnet werden, wodurch der Einfluss von zeitlichen Änderungen der Rückstreu- und atmosphärischen Bedingungen vernachlässigbar wird.

Am GIK wurde eine Methodik zur Erstellung von Zeitserien digitaler Geländemodelle aus wiederholten bistatischen SAR-Aufnahmen entwickelt (Kubanek u. a., 2017, 2018) und validiert (Kubanek u. a., 2013a; Kubanek u. a., 2013b). Die Methodik wurde erfolgreich an sechs aktiven Vulkanen eingesetzt (Kubanek u. a., 2018), die durch unterschiedliche vulkanische

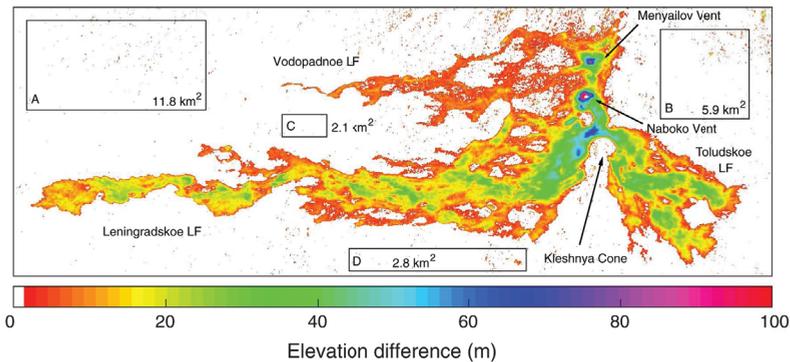


Abb. 43: Höhenänderung am Vulkan Tolbachik (Kamtschatka) während der Aktivitätsphase vom 27.11.2012 - 27.08.2013, berechnet aus einem prä-eruptiven und dem Mittel aus sieben post-eruptiven bistatischen SAR-Szenen. Das daraus abgeleitete Gesamtvolumen des basaltischen Lavaflusses beträgt $(0.53 \pm 0.01) \cdot 10^9 \text{ m}^3$, die Förderrate erreichte $247,93 \text{ m}^3/\text{s}$ (Kubanek u. a., 2017).

Aktivität gekennzeichnet sind. An den Vulkanen Merapi/Indonesien, und Colima/Mexiko, wurden die topographischen Änderungen durch kollabierende Lavadome erfasst (Abb. 42) und die Volumina des dabei freigesetzten pyroklastischen Materials bestimmt (Kubanek u. a., 2013c, 2015b).

Am Vulkan Shiveluch, Kamtschatka, konnte erstmals das Anwachsen eines Lavadoms mit bistatischen SAR-Szenen verfolgt werden. Das Verfahren wurde auch für die Volumenbestimmung basaltischer Lavaströme an den Vulkanen Tolbachik/Kamtschatka (Kubanek u. a., 2015a, 2017) und am Ätna, Sizilien/Italien, mit Erfolg eingesetzt (Abb. 43). In einer weiteren Fallstudie wurden Bodenhebungen von ca. -220m durch eine Laccolith-Intrusion am Vulkan Puyehue-Cordón Caulle in den chilenischen Anden bestimmt (Kubanek u. a., 2018). Die Fallstudien zeigen, dass verschiedene mit Volumen- und Topographieänderungen einhergehende Phänomene an aktiven Vulkanen anhand von bistatischen TanDEM-X-Aufnahmen mit hoher Genauigkeit untersucht werden können.

2.5 Dreidimensionale Erfassung von Bodenbewegungen im Bereich des Oberrheingrabens aus der kombinierten Analyse von PS-InSAR, Nivellements und GNSS-Daten

Der Oberrheingraben (ORG), eines der seismisch aktivsten Gebiete in Mitteleuropa, ist Teil eines komplexen Grabensystems, das von der Nordsee bis zum westlichen Mittelmeer reicht. Die meist kleinen Erdbeben sind das Resultat von aktiven tektonischen Prozessen, die an der Erd-

oberfläche zu horizontalen und vertikalen Verschiebungen führen. Auf Grund der komplexen geomechanischen Struktur des Gebietes ergibt sich ein zeitlich und räumlich variables Verschiebungsfeld, das nur mit entsprechend hochauflösenden Beobachtungsverfahren abgebildet werden kann. Das tektonische Signal wird zudem überlagert von anthropogen bedingten Bewegungen, die durch eine intensive Bewirtschaftung des Untergrundes hervorgerufen werden (Grundwasserentnahme, Ölförderung, flache und tiefe Geothermie, Bergbau).

Im Rahmen des über vier Jahre von der DFG geförderten Projektes "Vertikale Krustenbewegungen im Bereich des Oberrheingrabens aus der Analyse von Wiederholungsnivellements, SAR-Interferometrie und GNSS", wurden die im Dreiländereck Deutschland-Frankreich-Schweiz vorhandenen geodätischen Beobachtungsdatensätze erstmalig länderübergreifend zusammengeführt, systematisch analysiert und kombiniert. Ziel der Arbeiten war es, eine Gesamtkarte der vertikalen und horizontalen Oberflächenbewegungen im Gebiet des ORG einschließlich der Randgebirge zu erstellen und die gleichförmig ablaufenden tektonischen Bewegungen von transienten, auf die Förderung von Bodenschätzen zurückzuführenden Komponenten zu trennen (Fuhrmann u. a., 2013).

Eine wesentliche Komponente der geodätischen Datenbasis sind die bis in preußische Zeit zurückreichenden Nivellements. In Kooperation mit dem Institut national de l'information géographique et forestière (IGN, Frankreich), der Swisstopo (Schweiz) sowie den Landesvermessungsämtern aus Baden-Württemberg (LGL), Rheinland-Pfalz (LVermGeo) und dem Saarland (LVGL) wurden Präzisionsnivellements auf den Linien 1. - 3. Ordnung erfasst, vollständig digitalisiert und ausgewertet. Die landesweiten Nivellements werden alle ca. 20 Jahre durchgeführt und umfassen eine Zeitbasis von bis zu 140 Jahren (Fuhrmann u. a., 2014b). Aus der kinematischen Ausgleichung des Datenmaterials resultiert eine Karte der vertikalen Erdkrustenbewegungen mit Genauigkeiten von ca. 0,2 mm/Jahr (Abb. 44). Sie zeigt unter anderem natürliche, tektonisch bedingte Absenkungen des Oberrheingrabens relativ zu Schwarzwald und Vogesen von ca. 0,5 mm/Jahr, die durch teilweise deutlich größere anthropogen erzeugte Verschiebungen überlagert werden (Fuhrmann u. a., 2014a).

Die zweite Komponente des geodätischen Messsystems nutzt die zum Teil bis ins Jahr 2002 zurückreichenden Daten der im GNSS Upper Rhine Graben Network (GURN) zusammengefassten permanenten GNSS-Stationen (siehe dazu Abschnitt 2.6, „Das GNSS Upper Rhine Graben Network (GURN)“). Nach Beseitigung von Sprüngen und periodischen Signalanteilen wurden aus den Koordinatenzeitreihen der ca. 80 Stationen lineare Verschiebungsraten abgeleitet. Anschließend wurden über die Anpassung eines lokalen Eulerpols an die Horizontalkomponenten alle Bewegungsanteile abgespalten, die sich durch eine starre Rotation

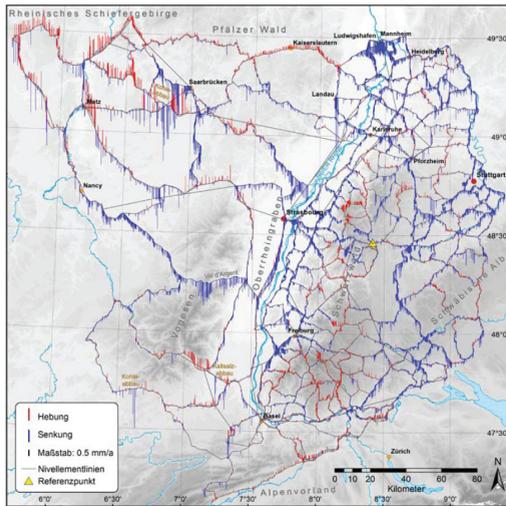


Abb. 44: Vertikalgeschwindigkeiten aus der kinematischen Ausgleichung von wiederholt gemessenen Präzisionsnivellements im Oberrheingrabengebiet (Fuhrmann u. a., 2014a,b).

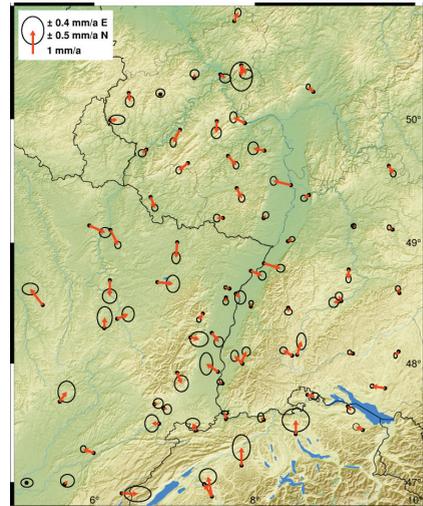


Abb. 45: Horizontalgeschwindigkeiten im ORG, berechnet aus den Koordinatenänderungen der in GURN zusammengefassten permanenten GNSS-Stationen.

beschreiben lassen. Das resultierende Bewegungsfeld (Abb. 45) enthält daher nur noch interne Deformationsanteile des ORG-Gebiets. Die horizontalen Verschiebungsraten liegen mit ca. 0,5 mm/Jahr in der gleichen Größenordnung wie die aus dem Nivellement abgeleiteten vertikalen Raten. Die Richtungen der horizontalen Verschiebungsvektoren zeigen ein recht inhomogenes Bild, was u. a. auf die an einigen Stationen noch recht kurzen Datenreihen zurückzuführen ist. Deutlich erkennbar ist jedoch eine NNW-SSO Kontraktion über das Messgebiet, die auf die fortgesetzte Kollision im Alpenraum zurückzuführen ist (Fuhrmann, 2017).

Aufnahmen von Radarsatelliten bilden die dritte Komponente des Messsystems. Die in diesem Projekt genutzten C-Band SAR-Satelliten (ERS-1/2 und Envisat) fliegen in einem durch ihre Bahn vorgegebenen Zyklus mit einer Wiederholungsrate von 35 Tagen über dasselbe Gebiet und nehmen dieses in einer Schrägsicht auf. Mit Hilfe einer interferometrischen Auswertung (PSI) eines Stapels von Aufnahmen konnten langzeitstabile Rückstreuer (sog. Persistent Scatterer bzw. PS-Punkte) im Bereich des ORG identifiziert werden. Abb. 46 zeigt die typische Verteilung der PS-Punkte in Mitteleuropa mit Häufungen über bebauten Gebieten oder Infrastrukturanlagen, während über bewaldeten oder landwirtschaftlich genutzten Gebieten im Allgemeinen keine zeitstabilen Rückstreubedingungen vorherrschen (Fuhrmann, 2017). Die aus der SAR-Interferometrie erhaltenen Verschiebungen beziehen sich auf die Richtung des

Bodenpunktes zum Satelliten (Line-of-Sight). Trotz dieser Einschränkungen übersteigt die Zahl der nutzbaren PS-Punkte die GNSS- und Nivellementsunkte um Größenordnungen. Die aus den Zeitreihen an jedem PS-Punkt abgeleiteten Bewegungskomponenten beziehen sich auf einen Zeitraum von ca. 20 Jahren. Die Verschiebungsraten liegen in der gleichen Größenordnung wie die GNSS- und Nivellementsresultate, ihre Genauigkeit ist um einen Faktor 2 schlechter.

Zur optimalen Nutzung der unterschiedlichen raum-zeitlichen Eigenschaften der verschiedenen Messverfahren wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein Verfahren zur Fusion der aus den drei Beobachtungstechniken resultierenden linearen Bewegungsraten entwickelt und getestet (Fuhrmann u. a., 2015). Während Nivellements nur vertikale Bewegungen erfassen können, eignen sich permanente GNSS-Phasenmessungen insbesondere für die Ableitung horizontaler Bewegungskomponenten. Die Höhenkomponente aus GNSS-Messungen wurde in der Kombination nicht verwendet, da sie deutlich schlechter bestimmt ist und mit den Nivellementsergebnissen ein wesentlich genauerer Datensatz zur Verfügung steht. Die aus PS-

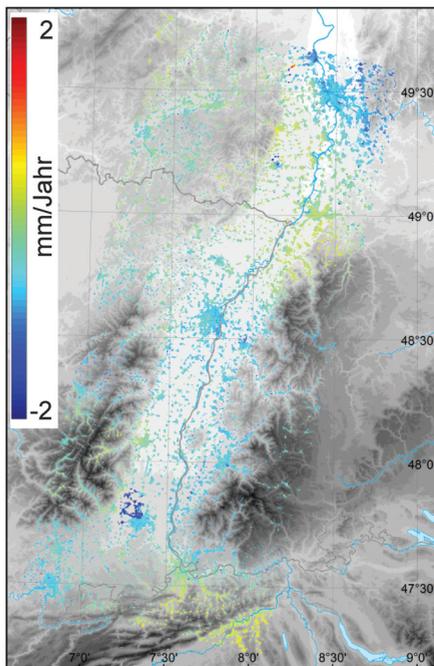


Abb. 46: Verschiebungsraten an langzeitstabilen Rückstreuern (PS-Punkte) nach Persistent-Scatterer-Analyse von Radarszenen der SAR-Satelliten ERS1 und ERS2 (absteigender Orbit 294).

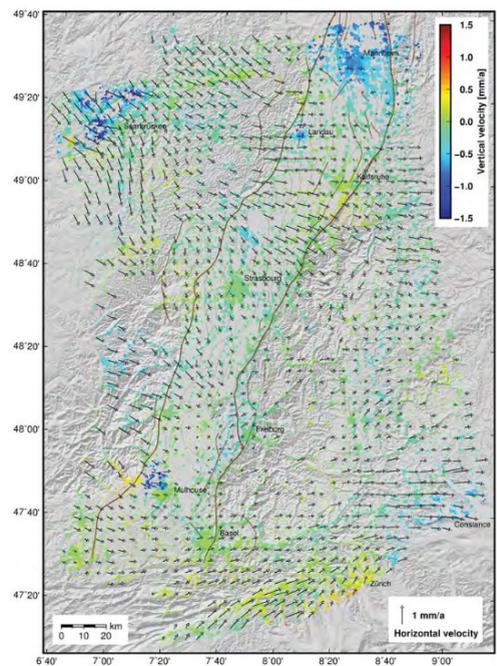


Abb. 47: Horizontale und vertikale Verschiebungsraten im Oberrheingraben in mm/Jahr, abgeleitet aus der Kombination von Nivellement, GNSS und PSI (Fuhrmann, 2017).

InSAR-Prozessierungen erhaltenen Bewegungsraten beziehen sich wiederum auf die Richtung des entsprechenden Bodenpixels zum Satelliten und enthalten sowohl horizontale als auch vertikale Komponenten für eine sehr große Anzahl von flächenhaft verteilten PS-Bodenpunkten. Aus der Kombination von Auswertungen auf- und absteigender Bahnbögen können neben den vertikalen auch die Ost-West-Komponenten der Bewegungsraten aufgelöst werden. Bei der Fusion der Ergebnisse wurde u. a. dem Unterschied im geodätischen Datum der drei Verfahren besondere Beachtung geschenkt (Fuhrmann u. a., 2015). Die Anwendung des entwickelten Fusionsverfahrens auf die im ca. 200 km × 300 km umfassenden Bereich des Oberrheingrabens vorliegenden Daten resultierte in einem hochgenauen, hochauflösenden dreidimensionalen Bewegungsfeld (Fuhrmann, 2017), das gemeinsam mit anderen Geowissenschaften weiter interpretiert werden wird (Abb. 47).

2.6 Das GNSS Upper Rhine Graben Network (GURN)

Andreas Knöpfler (Stadt Heidelberg, Vermessungsamt)

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, besteht am GIK eine lange Tradition auf dem Gebiet der Deformationsmessung in der tektonisch interessanten Region des Oberrheingrabens. Mit dem Aufkommen satellitengestützter Messmethoden wurden diese auch vom GIK in Form von Kampagnenmessungen für verschiedenste Projekte eingesetzt. Diese Kampagnenmessungen liefern zwar wichtige Informationen über tektonische Bewegungen, besitzen jedoch auch verschiedene Nachteile. So kann beispielsweise keine Information über ein saisonales Verhalten einzelner Beobachtungspunkte abgeleitet werden. Mit der flächendeckenden Etablierung von permanenten GNSS-Stationen, die entweder für die Bereitstellung von Korrekturinformationen für RTK-Dienste oder auch speziell für die Beobachtung geodynamischer Prozesse aufgebaut wurden, können diese Daten für ein ununterbrochenes Monitoring genutzt werden.

Als Nachfolgeprojekt für die erfolgreich verlaufenen Kampagnenmessungen im EUCOR-URGENT-Verbundprojekt wurde im September des Jahres 2008 zwischen dem Institut de Physique du Globe de Strasbourg (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, EOST, Université de Strasbourg, Frankreich, <http://www.eost.unistra.fr>, Stand: 05.09.2018) und dem Geodätischen Institut (GIK) der Universität Karlsruhe (heute: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, <http://www.gik.kit.edu>, Stand: 03.10.2018) die Kooperation GURN ins Leben gerufen. Dieses Netz umfasst derzeit ca. 80 von verschiedenen Anbietern betriebene permanente GNSS-Stationen im Bereich des Oberrheingrabens. Auf deutscher Seite werden vorrangig Stationen von SAPOS[®]-Baden-Württemberg und SAPOS[®]-Rheinland-Pfalz verwendet. Zu-

sätzlich fließen die Daten verschiedener EPN- und GREF-Stationen ein. Im südlichen Bereich wird das Netz durch Stationen der schweizerischen Landesvermessung swisstopo ergänzt. Auf französischer Seite werden Stationen verschiedener privater und öffentlicher Anbieter genutzt. Zusätzlich werden die Daten einiger vom EOST betriebener Stationen verwendet. Die Stationen der öffentlichen und privaten Anbieter wurden primär vor dem Hintergrund errichtet, Echtzeitdaten für RTK-Positionierungen im cm-Bereich zu generieren. Daher sind sie vorrangig auf Gebäuden installiert, wodurch sowohl ein einfacher Zugang zu Stromversorgung und Kommunikationsverbindungen als auch gute Abschattungsfreiheit sowie Sicherheit gegenüber Beschädigungen gewährleistet ist. Eine Nutzung dieser Stationen für geodynamische Zwecke stand hierbei bisher im Hintergrund, jedoch sollen die *SAPOS*[®]-Stationen in Zukunft vermehrt auch wissenschaftlichen Zwecken, insbesondere der Geodynamik und Atmosphärenforschung, dienen. Demgegenüber stehen Stationen, die beispielsweise vom EOST auf speziell für diesen Zweck errichteten Pfeilern aufgebaut wurden, um mit den dort gesammelten Daten geodynamische Untersuchungen durchzuführen. Die am Black-Forest-Observatory betriebene Station BFO1 wurde mit einem Betonfundament im anstehenden Fels gegründet, als Monumentierung wurde hierbei eine Dreibein-Konstruktion gewählt.

Die Historie der im GURN gesammelten Daten beginnt im Jahr 2002, in dem *SAPOS*[®]-Baden-Württemberg mit der Archivierung der RINEX-Beobachtungen begann. Die Daten der *SAPOS*[®]-Stationen von Rheinland-Pfalz liegen seit dem Jahr 2004 vor, die französischen Stationen sind meist jüngeren Ursprungs. Durch Abschluss eines Vertrages mit swisstopo im Jahr 2009 stehen seit DoY 195 2009 auch Daten ausgewählter Stationen in der Schweiz zur Verfügung. Sämtliche Beobachtungsdaten liegen im RINEX-Format in gepackter Form vor und fließen jede Nacht automatisch auf die am EOST betriebenen Server. Die Datenrate der archivierten RINEX-Dateien liegt bei 15 s bzw. 30 s. In unregelmäßigen Abständen werden die Daten aus Strasbourg auf den zur GNSS-Prozessierung genutzten Server am GIK kopiert und zusätzlich auf externen Datenträgern gesichert.

Durch die Verfügbarkeit kontinuierlicher GNSS-Information der Stationen können im Rahmen wissenschaftlicher Auswertungen sogenannte Tageslösungen berechnet werden. Diese können anschließend nach verschiedenen Gesichtspunkten analysiert werden. So ist es beispielsweise möglich, saisonale Veränderungen einzelner Stationen, welche unter anderem durch die Montage der Antennen auf Gebäuden verursacht werden, aufzudecken und rechnerisch zu korrigieren. Zudem können, aufgrund der kontinuierlichen Verfügbarkeit, die Bewegungsraten (vgl. Abb. 45) mit einer besseren Genauigkeit bestimmt werden.

2.7 PS-Interferometrie in urbanen Räumen

Die Erfassung von Bewegungen und Deformationen der Erdoberfläche mit Hilfe von interferometrischen Auswertungen von SAR-Aufnahmen trifft in urbanen Räumen auf spezifische Herausforderungen. Einerseits ist die räumliche Dichte permanenter Rückstreuer i. Allg. sehr hoch, sodass das Persistent-Scatterer-Verfahren (PSI) sehr effizient eingesetzt werden kann; andererseits bereiten große Bewegungsraten und deren kleinräumige Variationen sowie Kippungen und temperaturbedingte Ausdehnungen von Gebäuden Schwierigkeiten bei der Auswertung. Am GIK (Schenk, 2015) wurde ein speziell auf Anwendungen der PSI-Methode in urbanen Räumen zugeschnittenes Analyseverfahren entwickelt, das in einem Schritt neben den Bewegungsraten von PS-Punkten auch Phasenanteile durch die Punkthöhe über dem Referenzniveau sowie durch die thermisch bedingte Ausdehnung von Bauwerken berücksichtigt. Die prinzipiell extrem hohen rechentechnischen Anforderungen – insbesondere im Zusammenhang mit der Selektion von PS-Punkten – wurden mittels einer Erweiterung des SBAS (Small Baseline)-Ansatzes gelöst. Das Verfahren wurde schließlich erfolgreich bei der Auswertung eines SAR-Datenstapels von TerraSAR-X-Aufnahmen in der Stadt Staufen im

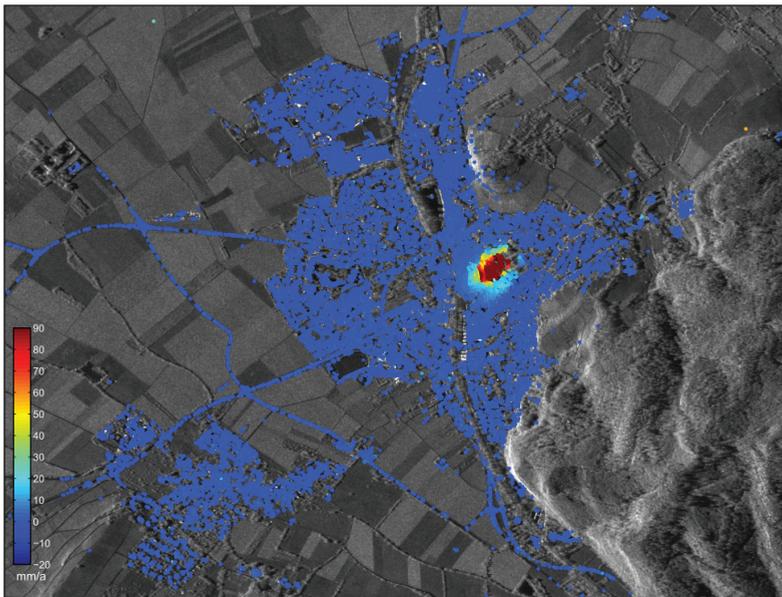


Abb. 48: LOS-Bewegungsraten im Untersuchungsgebiet Staufen, ermittelt auf Grundlage von 39 TerraSAR-X-Aufnahmen im Zeitraum Juli 2008 bis Juli 2010. Für das Gebiet von etwa $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ wurden insgesamt ca. 61.000 PS-Punkte gefunden (Schenk, 2015).

Breisgau angewandt (siehe Abb. 48). Im Zentrum von Staufen wurden in Folge von Bohrungen zur Installation von Erdwärmesonden im Jahre 2007 starke Bodenbewegungen (bis zu mehr als 10 cm/Jahr) auf kleinem Raum ausgelöst, die mit verminderten Raten auch heute noch anhalten. Ein Vergleich mit Auswertungen nach konventionellen Verfahren belegt das hohe Potenzial des innovativen Analyseverfahrens.

2.8 Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts aus der Analyse und Kombination von GNSS- und InSAR-Daten

Wasserdampf ist einer der wichtigsten klimarelevanten Bestandteile der Erdatmosphäre. Wegen der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität sind seiner Bestimmung mittels klassischer meteorologischer Messverfahren jedoch enge Grenzen gesetzt. Verbesserte Möglichkeiten ergeben sich aus der Nutzung satellitengestützter Mikrowellenmessungen. Geodätische Raumverfahren auf Mikrowellenbasis, wie z. B. GNSS-Messungen und SAR-Aufnahmen, sind Einflüssen durch die Atmosphäre ausgesetzt, wobei insbesondere die räumlich und zeitlich stark variierende Verteilung des atmosphärischen Wasserdampfs eine wichtige Rolle spielt (vgl. Abb. 49). Während in geodätischen Anwendungen der Wasserdampf als Störgröße aufgefasst wird, können aus denselben geodätischen Beobachtungen aber auch wichtige Informationen für die Meteorologie und Klimatologie gewonnen werden. GNSS- und InSAR-Beobachtungen ergänzen sich dabei hervorragend: Im Gegensatz zu GNSS-Phasenmessungen, die absolute Werte des integrierten Wasserdampfgehalts längs des Ausbreitungswegs zwischen dem Satelliten und der GNSS-Antenne enthalten, können aus PS-InSAR-Auswertungen lediglich

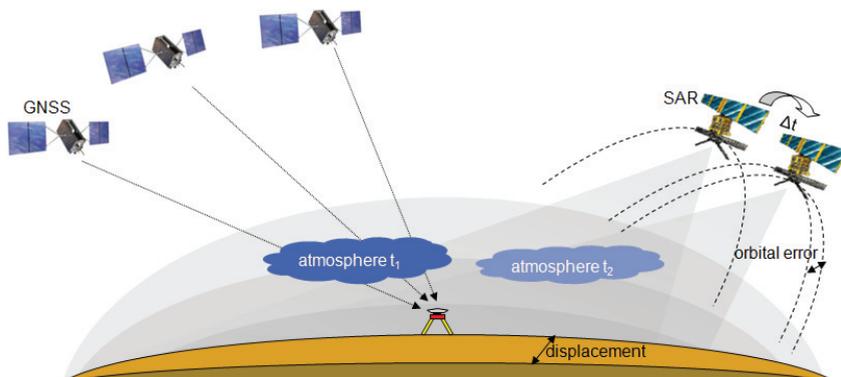


Abb. 49: Satellitengestützte Mikrowellenverfahren unterliegen vergleichbaren Einflüssen in der Atmosphäre.

relative Werte zwischen den Messungszeitpunkten, diese aber mit hoher räumlicher Auflösung, bestimmt werden. Ziel eines von der DFG geförderten Projekts ist die Fusion von punktwise gegebenen GNSS- und flächenhaft vorliegenden InSAR-Ergebnissen, um hochaufgelöste Karten des atmosphärischen Wasserdampfs abzuleiten und mit numerischen Wettermodellen zu kombinieren. Als Testgebiet dient der Oberrheingraben, in dem ein dichtes Netz von GNSS-Stationen (siehe GURN) vorhanden ist sowie SAR-Daten der Missionen Envisat und ERS-1/2 zur Verfügung stehen. In einem ersten Schritt wurden GNSS- und InSAR-Daten miteinander kombiniert, um mittels einer Kleinste-Quadrate-Inversion Werte der äquivalenten vertikalen Wassersäulen (Precipitable Water Vapor, PWV) auf einem regelmäßigen Gitter zu erzeugen (siehe Abb. 50 (a)). Vergleiche mit den aus optischen MERIS-Daten unabhängig bestimmten PWV-Werten zeigen sehr hohe Korrelationen (siehe Abb. 50 (b)).

In einem weiteren Schritt wurden diese hochauflösenden PWV-Werte mit den aus numerischen Wettermodellen ermittelten, schlechter aufgelösten Werten kombiniert, um auch Regionen mit geringer Kohärenz überbrücken zu können. Da GNSS-Beobachtungen die gesamte, auf trockenen und feuchten Anteilen der Atmosphäre basierende Signalverzögerung enthält, ist zur Bestimmung des integralen Wasserdampfgehalts die "trockene", hydrostatische Komponente aus Modellen oder terrestrischen meteorologischen Messungen zu ermitteln und vom Gesamteffekt zu subtrahieren. Hierfür wurde ein Verfahren auf der Grundlage regionaler meteorologischer Daten entwickelt, welches zu einer erheblichen Genauigkeitssteigerung gegenüber der Nutzung meteorologischer Modelle führt (Luo u. a., 2013; Alshawaf u. a., 2013).

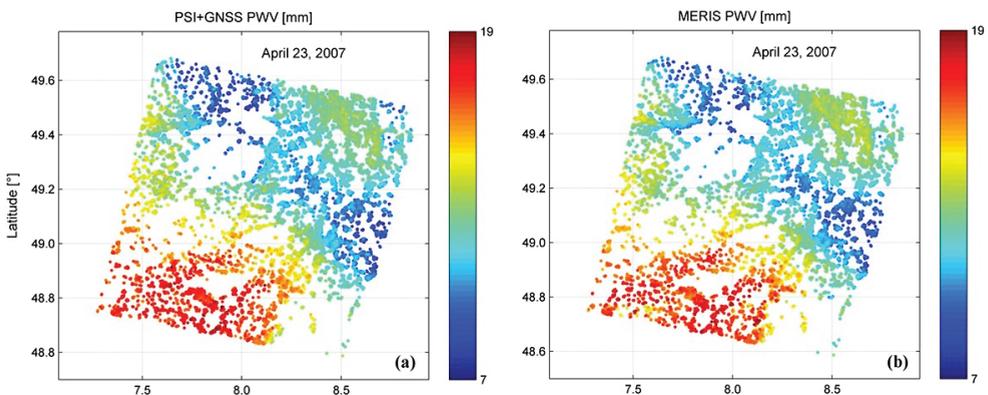


Abb. 50: (a) Absolute PWV-Werte, die durch Kombination von GNSS- und PSI-Beobachtungen am 23. April 2007 berechnet wurden. (b) Entsprechende PWV-Werte von MERIS (Alshawaf u. a., 2015).

2.9 Schwerefeldmodellierung mit Tesseroiden

Die Wirkungen von Massen im System Erde haben eine wichtige Bedeutung in der Erdsystemwissenschaft. Hierbei ist zum einen die Modellierung von Massenverlagerungen erforderlich um dynamische Prozesse in einen stationären Zustand abzubilden. Zum anderen ist es auch von zentraler Bedeutung Funktionale des Erdschwerefeldes, welche von unterschiedlichen Massen (Atmosphäre, Eis, Wasser, Topographie etc.) abhängig sind, zu glätten und somit einer geeigneten Modellbildung zuzuführen. Dies wird durch die Reduktion von Masseneffekten realisiert. In den Geowissenschaften Geophysik und Geodäsie handelt es sich insbesondere um topographische und isostatische Massen, die modelliert und reduziert werden.

Die sphärische Diskretisierung eines Volumenelements wird erstmals in Anderson (1976) als Tesseroid bezeichnet. Die Potential- und Schwerewirkung eines solchen sphärischen Volumenelements ist in Seitz und Heck (2001) und Heck und Seitz (2007) entwickelt. In Abbildung 51 ist ein sphärisches Tesseroid dargestellt.

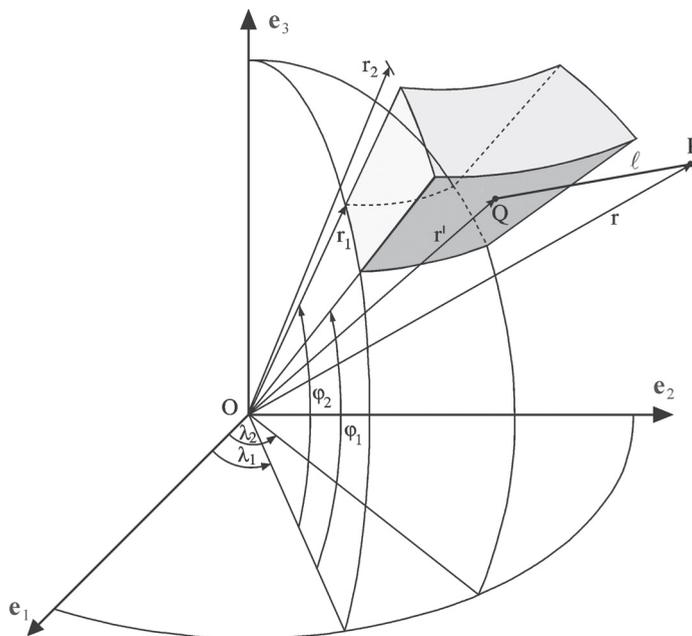


Abb. 51: Geometrie eines sphärischen Tesseroids (Heck und Seitz, 2007).

Die Wirkung eines Tesseroids auf die zweiten Ableitungen wurde von Wild-Pfeiffer (2007, 2008) und Grombein u. a. (2013) analytisch dargelegt. Eine Optimierung der Karlsruher Tesseroidmethode wurde von (Grombein u. a., 2013; Grombein, 2017a) vorgenommen.

2.10 Anwendungen der Tesseroidmethode

Zur Auswertung der topographischen und isostatischen Effekte im Afrikanischen Geoid-Projekt, das auf Seite 129 vorgestellt wird, ist die Tesseroidmethode in Anwendung.

Bei der Erstellung einer Bouguer-Karte für das Saarland (Seitz u. a., 2005, 2008) wurden die erforderlichen Massenreduktionen mit Tesseroiden effizient aus hochaufgelösten DGMs berechnet (Abb. 52).

Im Rahmen des REAL-GOCE Projektes wurden die bei der Gradiometrie-Mission GOCE gemessenen zweiten Ableitungen des Gravitationspotentials der Erde vor einer Weiterverarbeitung geglättet, was einen enormen numerischen Aufwand erforderte. Hier wurden die Effekte auf die zweiten Ableitungen effizient mittels Tesseroiden berechnet (Grombein u. a., 2014c,b,a).

Durch Vorwärtsmodellierung mittels Tesseroiden im Ortsbereich und anschließender harmonischer Analyse wurde ein globales Modell der Wirkung der topographischen und isostatischen Massen der Erde generiert und publiziert (Grombein u. a., 2015). Das Modell ist auf der Internetseite des International Centre for Global Earth Models (ICGEM, 2018) verfügbar.

Die drastischen Vorteile der Tesseroidmethode bezüglich der erforderlichen Rechenzeit gegenüber der Prismenmethode zeigen sich in den Auswerteschritten *remove-step* und *restore-step* bei der Berechnung des Quasigeoids für Baden-Württemberg, das im Abschnitt „Innovationen

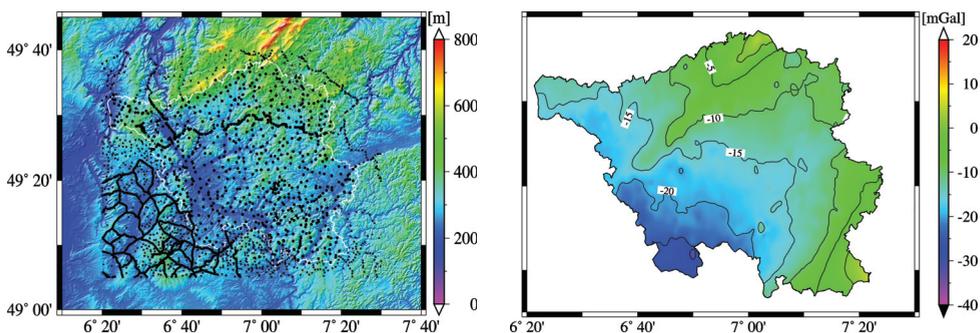


Abb. 52: Bouguerkarte für das Saarland: links DGM und Punktschwerewerte, rechts Bougueranomalien.

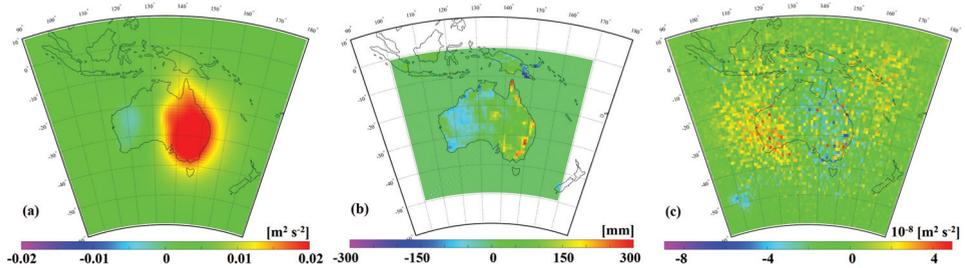


Abb. 53: Schätzung von Wassersäulen aus einem inversen Tesseroidansatz über Australien (Härter, 2016).
(a) Potentialänderung, (b) geschätzte Höhen der Wassersäulen, (c) Residuen auf Potentialebene.

am Geodätischen Institut“ im Kapitel „Quasigeoidberechnung für Baden-Württemberg“ (3.1) in dieser Festschrift vorgestellt wird.

Erste Ansätze zur inversen Tesseroidmodellierung wurden in Grombein u. a. (2012) präsentiert und in den Bachelor-Arbeiten Fuhrmann (2014) und Härter (2016) weitergeführt. Dabei wurden aus differentiellen Monatslösungen (Dezember 2008) für das Gravitationsfeld der Erde (siehe Abb. 53 (a)), die in einer Höhe von 250 km synthetisiert wurden, die Höhen der für die Unterschiede in den Lösungen verantwortlichen Wassersäulen über Australien geschätzt (siehe Abb. 53 (b)). Aus diesen geschätzten Wassermassen wurde das zugehörige Potential wieder durch Vorwärtsrechnung generiert und mit den Ausgangsdaten verglichen.

Die Residuen sind in Abbildung 53 (c) dargestellt und sind dem Betrag nach kleiner als $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}^2$. Diese vielversprechenden Resultate der inversen Tesseroidmodellierung werden im Rahmen der Neuausrichtung des Lehrstuhls Physikalische und Satellitengeodäsie in Richtung Geodätischer Erdsystemwissenschaft vertieft.

3 Lehrstuhl für Vermessungskunde und Geodätische Sensorik

Maria Hennes

3.1 Vorbemerkungen

Der Lehrstuhl Vermessungskunde und Geodätische Sensorik fokussiert in der Forschung auf die Vermessung bewegter Objekte, deren Geschwindigkeiten deutlich die beim Monitoring festzustellenden Kriechvorgänge übertreffen. Ohne Berücksichtigung und Optimierung der

verfahrensbedingten und geräteinternen Verzögerungszeiten der fusionierten Sensoren und Aktoren können die geforderten Genauigkeiten nicht erreicht werden. Die Thematik Multisensorfusion erhält damit eine weitere Herausforderung. All dies wird, neben weiteren Arbeiten auf dem Gebiet der Bestimmung belastbarer Messunsicherheiten sowie im Bereich der Selbstkalibrierung und Modellbildung, in Abschnitt 3.2, 3.3 und 3.4 näher beleuchtet, sofern die Sachverhalte nicht detailliert in Kapitel „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“ behandelt werden. Eng verknüpft ist diese Thematik auch mit der Untersuchung klassischer Tachymeter, was sowohl hinsichtlich ihres raumzeitlichen Verhaltens geschieht als auch in Bezug auf die Entwicklung hocheffizienter Feldprüfverfahren, die in möglichst kurzer Zeit die Funktionsfähigkeit des Instruments ermitteln sollen (vgl. Abschnitt 3.5). Gestiegene Anforderungen an Reflektoren für polare Messverfahren spannen ein weiteres Feld auf, das umfassender Betrachtung bedarf: zu diesen Anforderungen zählen unter anderem: möglicher Arbeitsbereich in Bezug auf Einfallswinkel (vgl. 360°-Reflektoren, Reflektorkränze, Cateyes etc.) und verträglicher Wellenlänge, Genauigkeitsforderungen (die bis zu wenigen μm betragen), Robustheit in der Handhabung, Antastverhalten, Unterstützung von nachführenden Systemen etc. (vgl. Abschnitt 3.6). Insbesondere bei der Erfassung von Freiformflächen sind die beeinflussenden Faktoren nicht zu unterschätzen (vgl. Abschnitt 3.7). Da Freiformflächen auch sehr fein strukturiert und/oder antastend nicht (effizient) zugänglich sein können, kommen auch reflektorlose Verfahren in Betracht; eine sehr kleinskalige Anwendung in der Ingenieurgeologie beschreibt Abschnitt 3.8. Auch auf anderen Gebieten werden die methodischen Grundgedanken unserer Forschungsschwerpunkte zur Anwendung gebracht: Eng verknüpft mit dem Gedanken der kinematischen Vermessung ist die Bestimmung des geometrischen Referenzpunktes eines VLBI-Teleskops während des Betriebs, also nicht im Stillstand. Auf sogenannten Ko-Lokationsstationen definiert dieser Punkt den mit Submillimeter-Genauigkeit geforderten Verknüpfungsvektor (local tie) zu einem Referenzpunkt eines anderen Raumverfahrens (vgl. Abschnitt 3.9). Hierbei ermöglicht der unterbrechungsfreie Betrieb des Teleskops während der Ingenieurvermessungsarbeiten die kontinuierliche Erfassung der Raumsignale und damit den optimalen Einsatz bei der Erfüllung der Beobachtungspläne des GGOS zur Generierung des ITRF sowie bei anderen astronomischen Forschungen. Nicht nur für diese ingenieurgeodätische Tätigkeit sind Genauigkeiten unter einem Zehntel Millimeter gefordert, sondern auch bei den Vermessungsaufgaben des KATRIN-Experiments des KIT, wo unser Lehrstuhl die anspruchsvollsten Vermessungsaufgaben unter extremen Randbedingungen wie zum Beispiel Reinraumbedingungen, sehr eingeschränkten Sichtverbindungen, virtuell definierten Objektpunkten etc. durchführt (vgl. Abschnitt 3.10). Noch höhere Genauigkeitsforderungen in Raum und Zeit sind

bei der Bestimmung der raumzeitlichen Transformationsparameter und der vorherigen Analyse der Bewegungsabweichungen von kooperierenden Robotern gefragt. Ziel ist es, letztendlich für jeden Steuerungsschritt (typischerweise alle 4 ms) synchron die aktuell erforderlichen Korrekturgrößen bereitstellen zu können. Die bisherigen Arbeiten dazu sind in Abschnitt 3.11 beschrieben, wobei einige Erkenntnisse in den von uns derzeit entwickelten mobilen Präzisionsroboter zur automatischen Höhenkontrolle von Hallenböden einfließen (vgl. Kapitel „Innovationen am Geodätischen Institut“, dort Abschnitt 4.2). Nicht nur bei diesem Projekt ist die exakt zeitbezogene Kenntnis sowohl der Position als auch der Orientierung (6DOF) mit hoher Genauigkeit notwendig. Da der Markt bisher derartige Messmittel mit der geforderten Genauigkeit nur extrem kostenaufwändig anbietet, wurde ein Low-Cost-System entwickelt, das in den meisten Aspekten den Spezifikationen des Konkurrenzproduktes nahekommt (vgl. Abschnitt 3.12). Hinsichtlich der Störeinflüsse auf optische Messungen rangieren refraktive Einflüsse immer noch weit oben. Gesucht sind Verfahren, die möglichst ohne Zusatzequipment Korrekturgrößen liefern. Das Turbulent Transfer Model (TTM) bietet hierzu sehr gute Ansätze, die an unserem Institut verfeinert wurden (vgl. Abschnitt 3.13).

3.2 Kinematisches Messen und Sensorfusion

3.2.1 Motivation

Die raumzeitliche Erfassung von Objekten betrifft viele Anwendungsbereiche der Ingenieurvermessung, aber auch von Nachbardisziplinen. Hierunter fallen sowohl Einzelpositionsbestimmungen mit zeitlichem Bezug als auch Navigationsaufgaben, also Maßnahmen zur Einhaltung eines bestimmten Kurses. Objekte von Interesse sind dabei die verschiedensten Fahrzeuge (insbesondere Bau- und landwirtschaftliche Maschinen sowie Transporthilfsmittel), Flugobjekte und Roboter bis hin zu Führungssystemen für Operationsbestecke von Chirurgen. Mit zunehmender Automatisierung werden Verfahren, die den Raum-Zeit-Bezug von Objekten herstellen, einen immer größeren Stellenwert bekommen, insbesondere dann, wenn derartige Objekte auf höchstem Genauigkeitsniveau kooperieren (Juretzko und Hennes, 2008; Juretzko u. a., 2008; Fleischer u. a., 2008; Hennes und Juretzko, 2008; Herrmann u. a., 2010).

3.2.2 Messmitteluntersuchungen

Am GIK liegt einer der beiden Forschungsschwerpunkte des kinematischen Messens auf der Entwicklung von geeigneten Kalibriermethoden, die auf das raumzeitliche Verhalten der Messmittel und insbesondere ihre Synchronisierbarkeit abzielen. Hierbei werden die unter-

schiedlichen Methoden Zeitstempelung und Triggerung betrachtet. Auch die Latenzzeiten zwischen einzelnen Komponenten eines Koordinatentripels oder eines Posensexupel sind relevant für die Qualität einer ermittelten Trajektorie. Darüber hinaus unterscheiden sich die Instrumentenspezifikationen in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Messzeit, sodass die optimale Kombination ebenfalls Gegenstand unserer Untersuchungen ist. Die Genauigkeit der raumzeitlichen Information hängt unmittelbar von der Objektgeschwindigkeit ab: Da sie in der Regel zwischen mehreren cm/s bis mehreren dam/s liegen, sind die Anforderungen an die Realisierung von geeigneten Zeitbasen und verzögerungsfreien Zugriffen hoch und erreichen den μ s-Bereich. Dieser schnelle Zugriff ist mit herkömmlichen Kommunikationstechniken nicht mehr realisierbar (siehe z. B. Hennes u. a., 2014). Im Beitrag „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“ in dieser Festschrift finden sich weitere Informationen zu Latenzzeiten und Synchronisation sowie detaillierte Angaben zu den Prüfeinrichtungen und den mit ihnen erzielten Ergebnissen, wobei insbesondere die Systeme Ti4CalibS (vgl. Abschnitt 3.4 und Depenthal und Barth, 2007; Depenthal, 2008, 2009c,b,a)) und STEVE (vgl. Abschnitt 3.2) zu nennen sind. Mit Ti4CalibS wurden die Latenzzeiten von Robottachymetern und iGPS untersucht. STEVE dient zur Untersuchung von Präzisionsmessmitteln wie Lasertrackern sowie zur Verifizierung von Sensorfusionsansätzen mit Hochpräzisionssensoren. Bei den untersuchten Robottachymetern zeigte sich ein nicht-kalibrierbares Verhalten der Latenzzeiten – wohl weil diese Instrumente (noch) nicht für Trajektorienbestimmungen konzipiert sind. Bei iGPS zeigte sich ein kalibrierbarer Instrumentenparameter, der seitdem vom Hersteller entsprechend berücksichtigt wird (Depenthal, 2012, 2010a,b).

3.2.3 Modellierung mittels Bayes-Ansatz und Sensorfusion

Die über die aktuelle Geschwindigkeit zunächst einfach darzustellende Raum-Zeit-Funktion der Trajektorie birgt die Herausforderung in sich, die hohe Korrelation zwischen den jeweils mit Unsicherheit behafteten Größen Position (bzw. Pose), Zeit und Geschwindigkeit so zu berücksichtigen, dass die Messunsicherheit der Zielgröße der jeweiligen Anwendung adäquat angegeben werden kann. Oftmals wird in diesem Zusammenhang die Kalman-Filterung angewendet, um aus zurückliegenden Messungen unter Berücksichtigung ihrer Stochastik auf die aktuellen Bewegungsgrößen zu schließen und letztendlich auf die nahe Zukunft zu extrapolieren. Solange die Bewegung hinreichend gleichförmig bleibt (wie meistens bei Fahrzeugen der Fall), sind derartige Prognosen belastbar. Verfahrensbefehle für Fertigungsabläufe mit Robotern und Werkzeugmaschinen beschreiben jedoch häufig keine kontinuierlichen Bewegungsabläufe, sondern unstetige Änderungen, z. B. spontane Richtungswechsel, die aufgrund

diverser Ursachen nicht perfekt realisiert werden. Sobald derartige Maschinen miteinander kooperieren, ist es Aufgabe der kinematischen Messtechnik, die raumzeitliche Abweichung der Ist- von der Solltrajektorie zu bestimmen. Kalman-Filter greifen hier zu kurz, da die Extrapolation anhand der zurückliegenden Trajektorie erfolgt: dieses Modell führt also an Stellen mit unstetiger Bewegungsänderung zu Überschwingern. Dies kann vermieden werden, wenn das Vorwissen über die Bewegung als Systemmodell mit zugeordneter Wahrscheinlichkeitsverteilung über den Bayes-Ansatz zusätzlich zum Messmodell mit ebenfalls zugeordneter Wahrscheinlichkeitsverteilung integriert wird. Dieser Ansatz wurde in den Arbeiten von Ulrich (2012, 2014, 2015, 2016) und Ulrich und Irgenfried (2014) beschrieben und seine Tauglichkeit mittels der im Rahmen dieser Arbeit speziell entwickelten raumzeitlichen Präzisionslinearbahn (STEVE) nachgewiesen. Diese Linearbahn zeichnet sich mit einer Positionsunsicherheit von $4\ \mu\text{m}$ ($k = 2$) bei $5\ \text{m/s}$ aus. Dies ist gleichbedeutend mit einer Synchronisationsfähigkeit unterhalb von $1\ \mu\text{s}$, und besitzt dadurch weltweit herausragende Spezifikationen (Ulrich, 2016). Im Beitrag „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“ in diesem Band wird die Präzisionslinearbahn STEVE ausführlich beschrieben. Dort finden sich auch Messergebnisse (vgl. Abb. 113 auf Seite 237), die die Tauglichkeit des Bayes-Ansatzes zeigen. Aufgrund dieses Nachweises liegt es nun nahe, generell die Möglichkeiten der Sensorfusion zu betrachten, wobei auch hier die Wahrscheinlichkeitsverteilungen und alle verfügbaren Vorinformationen integriert werden. Dieser Ansatz wird im Rahmen des Projektes "Entwicklung eines mobilen Roboters zur Höhenkontrolle von Böden" weiterverfolgt. Hier wird ein Teil der Informationen zur Bestimmung der Trajektorie mit einem polaren Messsystem (zum Beispiel Tachymeter) bestimmt. Ein anderer Teil der Informationen wird sowohl aus der Robotersteuerung des Fahrzeugs, die z. B. die Daten integrierter Odometer und IMU (Inertial Measurement Unit) verarbeitet, als auch aus den Verfahrbefehlen selbst erhalten. Nähere Angaben finden sich dazu im Beitrag „Innovationen am Geodätischen Institut“ in Kapitel 4 (Lehrstuhl für Vermessungskunde und Geodätische Sensorik). Letztendlich werden die Algorithmen der Sensorfusion zu einer effizienteren und optimierten Navigation in einem weiten Anwendungsspektrum führen.

3.3 Genauigkeitsmaße

3.3.1 Motivation

Genauigkeitsangaben, die aus Ausgleichsprozessen stammen (z. B. Standardabweichung der ausgeglichenen Parameter und der Gewichtseinheit) spiegeln immer die Abweichungen in

den Beobachtungen in Bezug auf die ausgeglichenen Größen. Wenn die Beobachtungen systematisch verfälscht sind, ergeben sich entsprechend verfälschte Zielparameter (Unbekannte), wobei sich die unbekannte(n) systematische(n) Abweichung(en) nicht in den Standardabweichungen niederschlägt und auch nicht niederschlagen kann. Diese Standardabweichungen werden also immer zu optimistisch ermittelt. Dem kann nicht durch eine globale Anhebung der Werte in der Kovarianzmatrix Rechnung getragen werden (Hennes, 2010, 2013). Im Zentrum der Arbeiten auf diesem Gebiet steht also die Entwicklung von Verfahren, die realistische und belastbare Genauigkeitsmaße liefern.

3.3.2 Verfahrensansätze

Ein zu untersuchender Verfahrensansatz ist eine sorgfältige Beschreibung der Korrelationen, wobei hierunter nicht (nur) die empirischen Korrelationen verstanden werden, da immanente Systematiken sich nicht zwingend in den empirisch erhobenen Daten zeigen. Eine weitere Möglichkeit ist, etwaige Abweichungsbeiträge in den Residuen, die durch Störeinflüsse entstehen und deren Wirkung auf das Residuum kalkulierbar ist, entsprechend in der Kovarianzmatrix gemäß einem adäquaten funktionalen Modell zu berücksichtigen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung der Monte-Carlo-Methode zur Ermittlung der Wirkung spezifischer Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf die Zielgröße. Dies kann sowohl anstelle der Varianzfortpflanzung geschehen als auch in Kombination mit Ausgleichsprozessen. Dieser Ansatz ist zwar rechenaufwändig, umgeht aber die Unzulänglichkeiten der Linearisierung bis zur 1. Ordnung.

Für die Bewertung und Angabe der Messunsicherheit hat sich in den letzten Jahren der Leitfaden "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", kurz GUM genannt, als international akzeptierter Standard durchgesetzt. Dieses Genauigkeitsmaß wird aus den zufälligen und aus den nicht erfassten systematischen Messabweichungen gleichermaßen analog der bekannten Varianzfortpflanzung berechnet. Letztere können allerdings nur aufgrund von Erfahrungen und Vorkenntnissen abgeschätzt werden. Dieser Ansatz ist aus dem Bayes-Ansatz ableitbar, der die Integration von jedwedem Vorwissen über den (Mess-)Prozess gemäß seiner Wahrscheinlichkeit vorsieht (Hennes und Heister, 2007).

Der Bayes-Ansatz ist der grundlegende Ansatz jeder statischen Betrachtung für die Wirkung von Messabweichungen auf eine Zielgröße. Auch die übliche Ausgleichung beispielsweise nach dem Gauß-Markov-Modell ist aus diesem Ansatz ableitbar.

3.3.3 Praxisbezug

Lösungen nach dem Bayes-Ansatz erfordern jedoch spezifische Rechentechniken wie Partikelfilter oder Ähnliches, weswegen die Umsetzung in der Praxis (noch) nicht erfolgt ist. Die Messunsicherheit stellt ein Genauigkeitsmaß dar, das die realen Genauigkeitsverhältnisse am zutreffendsten abbildet und gleichzeitig im Vermessungsalltag gut handhabbar ist. Das GUM-Konzept stellt die Basis für alle messenden Disziplinen dar und dient der Verständigung unter den verschiedenen Fachbereichen.

Herstellerangaben für die Messgenauigkeit klassisch geodätischer Instrumente lehnen sich teilweise an Industrienormen (DIN, ISO) an, folgen aber auch herstellereigenen Spezifizierungsweisen. Demgegenüber werden in Nachbardisziplinen in der Regel sensorbeschreibende Angaben wie Auflösung, Empfindlichkeit, Auflösungsvermögen, Reproduzierbarkeit und Linearität verwendet. Im angloamerikanischen Bereich gewinnt für einige Messsysteme die Spezifizierung mittels des MPE (Maximum Permissible Error) an Bedeutung (Hennes, 2007b). Die Aufgabe unserer Arbeitsgruppe besteht nun darin, derartige Genauigkeitsmaße für den geodätischen Gebrauch zu interpretieren und die Berechnungsalgorithmen nachvollziehbar zu machen (Schwarz und Hennes, 2016).

3.4 Selbstkalibrierung und Modellbildung

3.4.1 Motivation

Bei unterschiedlichsten Anwendungen werden in der Praxis immer höhere Ansprüche an die zu erreichende Messunsicherheit gestellt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist es notwendig, das Leistungspotential des eingesetzten Messsystems gänzlich auszuschöpfen. Aufgrund der Toleranzen in der Fertigung des Instrumentes sind beispielsweise die geometrischen Achsbedingungen nicht realisiert. Auch elektronische Bauteile unterliegen Toleranzen und Exemplarstreuungen. Infolgedessen ist es zwingend geboten, derartige Abweichungen mathematisch zu beschreiben und deren elementaren Parameter zu bestimmen (Kalibrierung), um sie korrigierend bei Messungen zu berücksichtigen.

3.4.2 Selbstkalibrierung

Durch eine Kalibrierung wird die Abweichung des Istwertes zum Sollwert bestimmt. Kalibrierparameter können von den Umgebungsbedingungen abhängig und zeitlich variabel

sein. Üblicherweise werden sie in Bezug auf eine Referenz bestimmt, die mit übergeordneter Genauigkeit realisiert werden muss. Dies erfordert zusätzlichen Aufwand, der vor allen Dingen nicht ohne Weiteres im unmittelbaren Anwendungsszenario zu leisten ist. Deswegen benutzt die geodätische Messtechnik schon lange Messverfahren, die zumindest für einige kritische Kalibrierparameter eine in den eigentlichen Messprozess integrierte Kalibrierung (also Selbstkalibrierung) gewährleisten, ohne eine Referenz zu realisieren, zum Beispiel die Zweilagenn-Messung zur Elimination (oder Bestimmung) von Ziel- und Kippachsabweichung. Selbstkalibrierungsverfahren beruhen auf der Nutzung von – vorwiegend geometrischen – Restriktionen (z. B. Winkelsummen) und sind in der Metrologie durchweg anerkannt. Es gilt nun, für neuartige Messgeräte derartige Verfahren zu entwickeln, die eine Qualitätssicherung am Messort ohne (oder nur mit geringem) zusätzlichen Aufwand gewährleisten.

Da Lasertracker oft mit hohen Ansprüchen an die Qualitätssicherung eingesetzt werden, sind Simultankalibrierungsverfahren erforderlich, da durch sie ein Beitrag zur Integrität geleistet wird. Beim geometrischen Aufbau eines Lasertrackers sind grundsätzlich zwei Varianten zu unterscheiden, die sich aus der Bauform ableiten: entweder ist lediglich der Ablenkspiegel oder die komplette Strahlquelle kardanisch gelagert. Bei dem Lasertracker mit kardanisch gelagertem Ablenkspiegel besteht das geometrische Modell, abgesehen von hochharmonischen Encoderabweichungen, aus insgesamt 16 Parametern.

Aufgrund der hohen Genauigkeiten eines Lasertrackers ist die Bereitstellung einer Referenz mit übergeordneter Genauigkeit nur mit großem Aufwand zu realisieren. Hier bietet sich die Bestimmung der genannten geometrischen Parameter durch eine Selbstkalibrierung an, wobei die Zwangsbedingungen über geometrische Restriktion eingeführt und die zu verwendenden Festpunkte als stabil anzunehmen sind. Um ein optimales Ergebnis zu erzielen und den zeitlichen Aufwand möglichst gering zu halten, sind alle geometrischen Parameter des Lasertrackermodells gleichzeitig zu bestimmen und zusätzlich sollen die Korrelationen zwischen den einzelnen Parametern minimal sein. Faller (2012) entwickelt für die Bestimmung der wesentlichen 14 geometrischen Parameter des mathematischen Modells einen iterativen Prozess, der eine optimale theoretische Netzkonfiguration eines Festpunktfeldes sowie die zugehörige Lage der Instrumentenstandpunkte festlegt. Eine Abnahme der Korrelation zwischen den einzelnen Iterationsstufen ist deutlich zu erkennen (vgl. Abb. 54).

In dem von Faller (2012) entwickelten Algorithmus werden die räumlichen Gegebenheiten durch die Integration von CAD-Daten berücksichtigt. Somit kann das Festpunktfeld für beliebige Umgebungsbedingungen (Fertigungshallen, Messstände, Labore etc.) optimiert werden. Auf Basis dieser detaillierten Simulationen ist ein Festpunktfeld für die Selbstkalibrierung

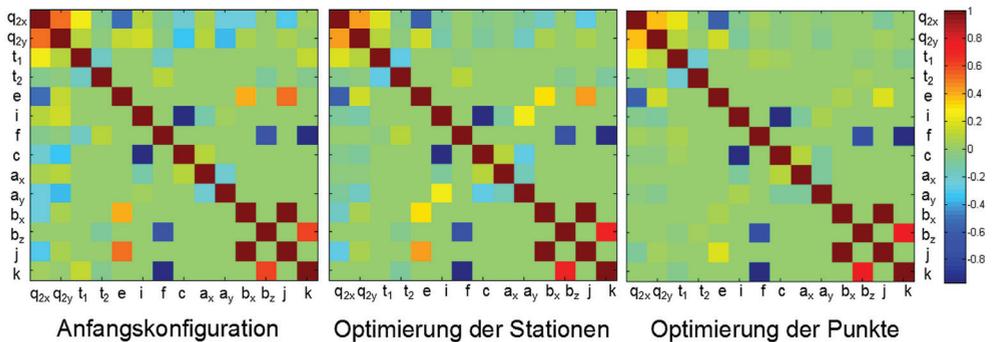


Abb. 54: Beispiele der Korrelationen (farbig markiert, unkorreliert = grün) zwischen den zu bestimmenden geometrischen Parametern ($q_{2x} \dots k$) eines Lasertrackers bei unterschiedlichen Netzkonfigurationen während des Optimierungsprozesses (Faller, 2012).

der beiden Lasertracker des GIK mit kardanisch gelagertem Ablenkspiegel im Messlabor des GIK realisiert. Es besteht aus 13 Festpunkten und sieben Instrumentenstandpunkten, wobei zur Anzahl der Standpunkte auch die gezählt sind, die lediglich eine neue Stationierung des Instruments auf (annähernd) derselben Stelle mit neuer Orientierung erfordern.

3.4.3 Modellbildung des Messprozesses

Die im Abschnitt 3.4.2 genannten geometrischen Parameter des Lasertrackers mit kardanisch gelagertem Ablenkspiegel gelten sowohl für statische und als auch für kinematische Messprozesse. Für die Bestimmung der kinematischen Messunsicherheit der Trajektorie eines bewegten Reflektors – beispielsweise beim taktilen Scannen von Objektflächen – sind allerdings weitere Faktoren, wie z. B. die Meteorologie, die Geschwindigkeit bzw. die Beschleunigung des Messmittels oder die Latenzzeit zwischen den einzelnen Sensorabgriffen zu berücksichtigen (vgl. Ulrich, 2013). In diesem Kontext erfolgten weitere Untersuchungen zur Beurteilung des Messprozesses und den kinematischen Eigenschaften von polaren Messsystemen, wie einer Roboter-Totalstation oder eines Lasertrackers mit sogenanntem Absolutdistanzmesser (ADM) und geringen Messfrequenzen, beispielsweise in Bertels (2018) oder Kern (2014).

Der Lasertracker mit kardanisch gelagertem Ablenkspiegel ist um eine aufgesetzte Kamera zu ergänzen, falls sechs Freiheitsgrade (6DOF) zu ermitteln sind. Dies ist erforderlich zur Führung einer passiven Messprobe – beispielsweise bei der taktilen Antastung einer Oberfläche (vgl. Naab, 2016), oder bei dem kombinierten Einsatz eines handgeführten Scanners. Infolgedessen ergeben sich neue geometrische Konstellationen bei der Bestimmung eines Messpunktes. Die

damit verbundene Erweiterung des mathematischen Modells des Lasertrackers in Kombination mit einer passiven Messprobe ist in Meerländer (2015) aufgeführt und analysiert.

Ferner treten bei der Modellierung und Beurteilung eines Messprozesses insbesondere bei nicht-linearen mathematischen Zusammenhängen Schwierigkeiten auf, die zu berücksichtigen und in Lösler u. a. (2016) diskutiert sind.

3.5 Prüfung und Kalibrierung von Tachymetern

Am GIK werden sowohl Standard-(Labor-)Prüfeinrichtungen für Tachymeter wie

- festinstallierte Kollimatoren zur Achsprüfung,
- ein Frequenzprüfplatz zur Maßstabsprüfung,
- eine pfeilervermarkte Prüfstrecke für Distanzen bis zu 1.200 m sowie,
- ein Lasertracker zur Verifizierung von Referenzgeometrien,

als auch Eigenentwicklungen zur Untersuchung weitergehender instrumenteller Abweichungen wie

- Interferometerbahn zur Bestimmung der Additionskorrektion im Nahbereich bis 24 m,
- Präzisions-Linearmessbahnen für kinematische Prüfungen im Nahbereich,
- Dreharne für kinematische Prüfungen,
- halbautomatisierte Teilkreis- bzw. Encoderprüfung,
- Prüffelder für Feldprüfverfahren

genutzt.

Um praxisgerechte Feldprüfungen bei vertretbarem Zeitaufwand durchführen zu können, wurde ein Verfahren entwickelt und verifiziert, das Eingang in das DVW-Merkblatt Nr. 10 "Ein einfaches Feldprüfverfahren für Tachymeter" (DVW AK 3 und 4, 2017) gefunden hat. Mit einem zeitlichen Aufwand unter einer Stunde pro Instrument unter Verwendung der Standardausrüstung können praxisgerechte Aussagen zur Winkelmessgenauigkeit, zur Zielachsabweichung, zur Höhenindexabweichung, zur Additionskonstante sowie zur Genauigkeit der Bestimmung von 3D-Koordinaten gemacht werden. Dazu werden in einem einfach zu realisierenden Testfeld Messungen von drei Instrumentenstandpunkten (A, B, C) zu drei Zielpunkten (R1, R2, R3) durchgeführt (vgl. Abb. 55).

Bisher lag das Augenmerk des Praktikers lediglich auf der Prismenkonstante als Anteil an der Additionskonstante. Jedoch sind noch weitere Aspekte maßgebend für die erreichbare Genauigkeit:

- A Eigenschaften des optischen Systems in Bezug auf die Richtungs- und Distanzmessung
- B Montierung des optischen Systems in der mechanischen Halterung
- C Zusammenwirken des Reflektors mit dem zielverfolgenden System,
z. B. (Video-)Tachymeter, Lasertracker etc.
- D Nachführeinrichtung des Reflektors.

Am GIK widmen wir uns diesen Aspekten, deren detaillierte Einflussfaktoren in Abbildung 56 als Ishikawa-Diagramm aufgezeigt sind, und zwar in Bezug auf folgende Reflektortypen:

1. Reflektoren mit Standard-Montierung für DreifüÙe und Lotstäbe
 - a. Standardprismen
 - b. 360°-Reflektoren
2. In Kugeln gefasste Reflektoren
 - a. Winkelspiegel
 - b. Prismen
 - c. Cateye
 - d. n2-Reflektoren.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen exemplarisch aufgezeigt. Die Behandlung aller Kombinationen und physikalischer Grundlagen würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen. Nähere Ausführungen finden sich in Naab (2016).

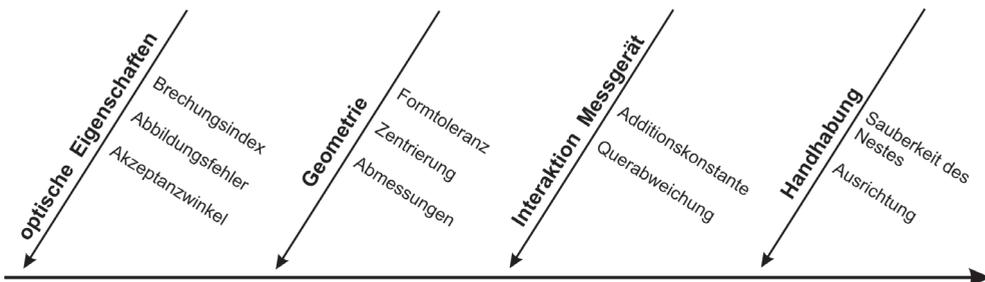


Abb. 56: Durch den Reflektor bedingte Einflüsse auf das Messergebnis.

Ferner sind hierin die Einflüsse die bei der taktilen Antastung von Oberflächen mit einem Kugelreflektor auftreten eingehend diskutiert (vgl. auch Abschnitt 3.7.2 Taktile Messtechnik).

Die Aspekte A, B und C für Kugel-Winkelspiegel (2.a.)

Wenn die Winkelspiegel eines Corner-Cube-Reflektors (CCR) nicht exakt in einem 90° -Winkel zueinander stehen, ist der einfallende Strahl nicht exakt parallel zum ausfallenden Strahl. Sofern der Lasertracker bei der Nachführung auf den Reflektor noch eine Restregelabweichung aufweist und das PSD-Element nicht exakt justiert ist, tritt ein Winkelfehler auf. Dieser Fehler sei mit Run-out bezeichnet und ist erkennbar, wenn die Reflektorkugel in ihrem Nest um die Strahlachse gedreht wird, weil sich dadurch die Raumrichtung der Spiegelflächen und damit die Strahlrichtung ändert. Natürlich enthalten die Ergebnisse dieses Experiments nicht nur die Abweichungen des Run-out, sondern auch Form- und Zentrierabweichungen der Reflektorkugel. Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse für einen BRR (spezielle bruchsichere Ausführung eines CCR).

Die Aspekte A und B für Kugel-Prismen (2.b.)

Für einen namhaften Hersteller von Kugelprismen wurden für verschiedene Reflektorserien mit Vollglasprismen die Zentralpunkte mit Genauigkeiten im Bereich von zehntel Millimetern sowie das Verhalten der Reflektoren bei Fehlausrichtung bestimmt. Der "Zentralpunkt" liegt in dem vom Beobachter aus sichtbaren Schnittpunkt der Spiegelflächen, der aufgrund des Brechungsindex des Glaskörpers vom tatsächlichen geometrischen Schnittpunkt der Spiegelflächen abweicht. Um den Lagefehler bei einer Fehlausrichtung des Prismas minimal zu halten, sollte der Zentralpunkt entlang der Achse liegen um die der Reflektor im Nest rotiert wird. Dies ist bei den meisten Reflektortypen realisiert.

Im Vorfeld wurden Untersuchungen durchgeführt, welche Methoden für diese Aufgaben besonders geeignet sind und inwiefern sich Laborergebnisse auf die Praxis übertragen lassen. Es wurden sowohl Methoden der Selbstkalibrierung als auch der Vergleich mit einem Referenzreflektor über einen Bereich von wenigen Metern bis zu annähernd einem Kilometer untersucht. Als besonders geeignet erwies sich die Prüfung im Nahbereich mit Hilfe eines Lasertrackers unter Verwendung eines Referenzreflektors. Dabei konnten Einflüsse der Meteorologie ebenso minimiert werden wie die Einflüsse eines Tachymeters in Form einer instrumentenseitigen Additionskorrektur oder der einer zyklischen Abweichung, die selbst bei sehr hochwertigen Instrumenten einige zehntel Millimeter betragen kann.

Für die Bestimmung des Zentralpunktes wird zunächst die Position eines CCR als Referenz ermittelt. Aufgrund des in Abbildung 57 vorgestellten Versuchs konnte gezeigt werden, dass dieser Referenzpunkt mit etwa $10\ \mu\text{m}$ bis maximal $20\ \mu\text{m}$ genau bestimmbar ist. Wegen der deutlich geringeren Prüfanforderungen in der Größenordnung von einem Zehntel Millimeter an den zu prüfende Kugelreflektor ist es ausreichend, den Prüfling in größeren Schritten um die Strahlachse zu drehen, was bei zehnmahliger Wiederholung zu der gewünschten Wiederholgenauigkeit für die Koordinaten des Zentralpunktes führt. Aus diesen lassen sich die Exzentrizitäten des Zentralpunktes sowohl innerhalb des zu prüfenden Prismas als auch in Bezug auf den Referenzreflektor feststellen. Bei der Untersuchung von 65 Prismen aus drei verschiedenen Serien lagen die Abweichungen zu den Sollwerten von wenigen Ausnahmen abgesehen unter einem Zehntel Millimeter.

Auch die Untersuchung der Auswirkung einer Fehlausrichtung des Prismas wurde mit Hilfe eines Lasertrackers durchgeführt. Nach der Bestimmung einer Referenzposition mit Hilfe eines CCRs erfolgt der Austausch gegen das zu prüfende Prisma. Dieses wird dann in 10° -

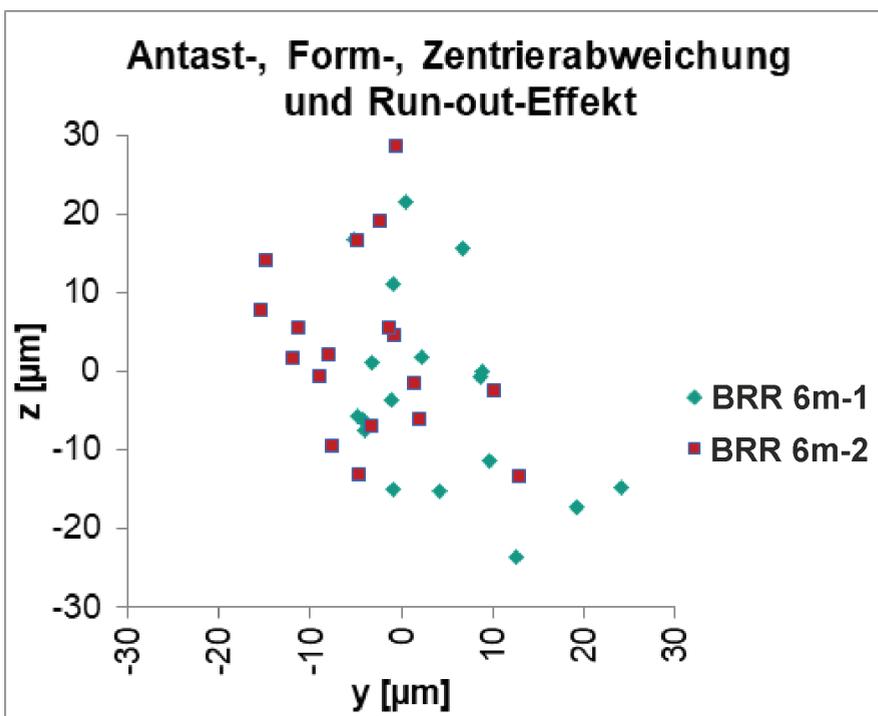


Abb. 57: Quer- und Höhenabweichungen zweier BRR-Exemplare im Test auf 6 m Distanz bei Umdrehung in Schritten von $20\ \text{gon}$ um die Strahlachse.

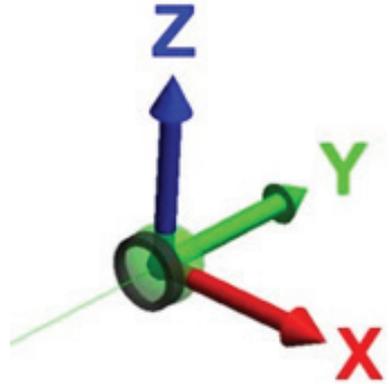
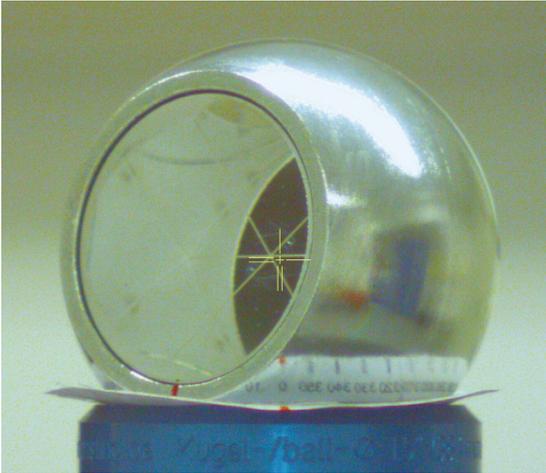


Abb. 58: Kugelprisma und Achsbezeichnungen.

Schritten um die Z-Achse verdreht (vgl. Abb. 58), bis keine Messung mehr möglich ist. Die Abbildung 59 zeigt beispielhaft die Abweichungen eines 1,5"-Kugelreflektors, der mit einem Glasprisma mit einem Durchmesser von 25 mm bestückt ist: selbst im Grenzbereich, in dem überhaupt noch eine Messung durchgeführt werden kann, beträgt die maximale seitliche Abweichung weniger als 1 mm, die Höhen- und Streckenabweichungen liegen sogar noch darunter.

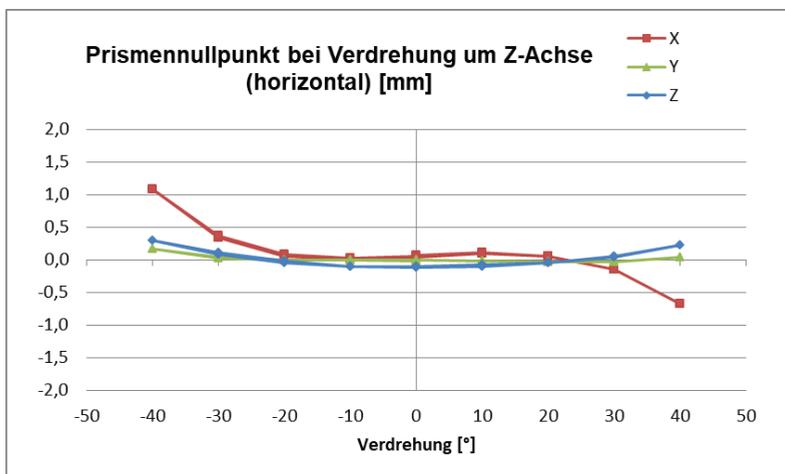


Abb. 59: Abweichungen bei Verdrehung eines 1,5"-Kugelreflektors mit 25 mm Glasprisma.

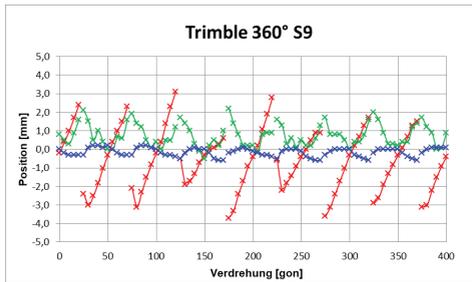


Abb. 60: Messverhalten eines Trimble S9 Tachymeters auf einen Trimble-360°-Prismenkranz (rot = Quer-, grün = Distanz- und blau = Hochkomponente, vgl. auch Abbildung 59).

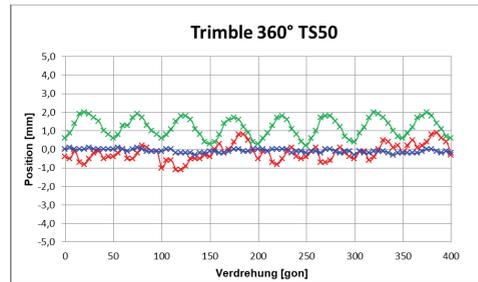


Abb. 61: Messverhalten eines Leica TS50 Tachymeters auf einen Trimble-360°-Prismenkranz.

Der Aspekt C für 360°-Reflektoren (1.b.)

Derzeit liegt der Fokus auf Untersuchungen zum Anzielverhalten von 360°-Prismen. Bisherige Untersuchungen betrachteten vornehmlich die Kombination eines bestimmten Reflektor(typ)s mit einem bestimmten Tachymeter(typ). Da unterschiedliche Tachymeter(typen) unterschiedliche Verfahren zur automatischen Anzielung verwenden, ist zu erwarten, dass sich die "Reflektoreigenschaften" je nach verwendetem Tachymeter unterscheiden. Ziel der neueren Untersuchungen ist es, das Zusammenspiel zwischen unterschiedlichen Typen von 360°-Reflektoren und unterschiedlichen automatisch zielenden Tachymetern bei unterschiedlichen Distanzen näher zu beleuchten. Die Positionsabweichungen eines aus acht Einzelprismen bestehenden 360°-Reflektors gegenüber einem Referenzreflektor (CCR) sind in den Abbildungen 60 und 61 beispielhaft dargestellt. Der 360°-Reflektor wurde bei 15 m Distanz in 5-gon-Schritten um die ihre Z-Achse gedreht und in jeder Position mit zwei verschiedenen automatisch zielenden Tachymetern angemessen.

Der Aspekt B für n2-Reflektoren (2.d.)

Reflektoren in kugelförmiger Ausführungen aus Glas mit dem Brechungsindex $n = 2$ (vgl. Abb. 62) bewirken keine ausrichtungsabhängigen Messfehler. Da das Glasmaterial zu empfindlich für eine unmittelbare Objektantastung ist, wurde am GIK eine Fassung entwickelt und der Montageprozess der Kugel in diese Fassung optimiert. Die Montierung erfolgte mit einem maximalen Abstand der Kugelzentren von $36 \mu\text{m}$. Diese wirkt je nach Ausrichtung in Bezug auf die Flächennormale mit einem Betrag zwischen $-36 \mu\text{m}$ und $+36 \mu\text{m}$, wobei sie konstant (z. B. auf nahezu $0 \mu\text{m}$) gehalten werden kann, wenn der Reflektor verschoben

und nicht gerollt wird (Bernhart, 2010; Bernhart und Hennes, 2012). Dieser Reflektor ist deutlich handlicher (geringeres Gewicht) und bietet aufgrund seines geringeren Durchmessers erhebliche Vorteile bei der Handhabung, insbesondere bei der Antastung.

Der Aspekt D für Kugelreflektoren (2.)

In der Ingenieurvermessung gibt es immer mehr Anwendungsfelder, für welche der zulässige bzw. aus Gründen der Genauigkeit vertretbare Arbeitsbereich (Einfallswinkel) zu klein ist. Dies ist z.B. bei der automatischen Referenzpunktbestimmung von Radioteleskopen der Fall, aber auch bei anderen komplexen Ingenieurprojekten, die unter Umständen auch kinematische Vorgänge einschließen. Da das Glasmaterial von n_2 -Reflektoren hinsichtlich thermischer Gradienten äußerst empfindlich ist, lassen sie sich nicht in rauen Umgebungen einsetzen. Aus diesem Grund wurde an unserem Institut ein Reflektorträger für Kugelreflektoren entwickelt, der die Verschwenkung um 360° um eine Achse erlaubt. Der Träger weist mit Exzentrizitäten von weniger als $2\ \mu\text{m}$ und entsprechend kleinen Lagerungsstabilitäten eine weitaus höhere Genauigkeit auf, als mit herkömmlichen 360° -Reflektoren erreichbar ist. Details dazu finden sich im Beitrag „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“, Abschnitt 3.3, Seite 239.

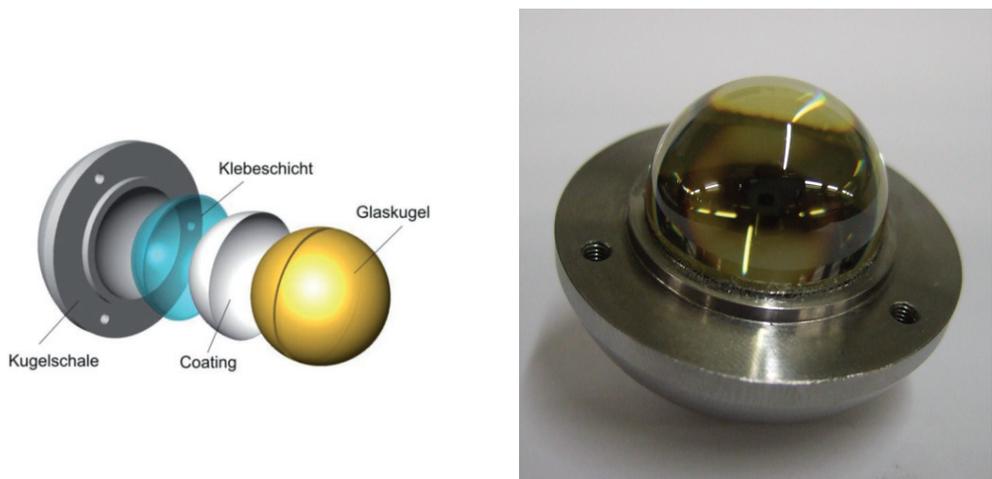


Abb. 62: n_2 -Reflektor: Konstruktionszeichnung des Aufbaus und mit montierter Fassung zur taktilen Antastung.

3.7 Freiformflächen

3.7.1 Motivation

Bei vielen alltäglichen Produkten, bei Bauwerken oder auch bei Land-, Wasser- sowie Luftfahrzeugen werden aus Designgründen Freiformflächen zugrunde gelegt. Infolge von Fertigungstoleranzen, Gestaltabweichungen, Verschleißerscheinungen oder Deformationen unterliegen Objekte mit sogenannten Regelgeometrien (z. B. Kugel, Ebene) gewissen Variationen, so dass zur exakten Modellierung auch hier Freiformflächen angenommen werden müssen. Die Erfassung derartiger Geometrien kann mit taktilen oder optischen Messverfahren erfolgen, die jeweils verschiedene Eigenheiten besitzen, die in der Modellierung entsprechend berücksichtigt werden müssen. Zur Darstellung der gemessenen Objektgeometrien oder auch zur Korrektur von systematischen Abweichungen sind kontinuierliche mathematische Beschreibungen der Freiformflächen notwendig und müssen aus den erfassten Messpunkten abgeleitet werden.

3.7.2 Taktile Messtechnik

Bei der taktilen Antastung von Objekten wird die Oberfläche immer indirekt repräsentiert, da der erfasste Messpunkt nicht mit dem tatsächlichen Ist-Berührungspunkt übereinstimmt. Infolgedessen ist eine Korrektur des Offsets des eingesetzten Messmittels notwendig (vgl. Juretzko und Richter, 2009), wobei die lokale Normalenrichtung im Berührungspunkt zu ermitteln ist (vgl. Hennes, 2007a, 2006b). Für die verschiedenen Messmittel, wie Prismen, Kugelreflektoren, Taster oder Messadapter, bestehen unterschiedliche Verfahren, mit denen die vorliegende Normalenrichtung approximiert und mit denen ein einzelner Messpunkt korrigierbar ist (vgl. Naab, 2016). Bei mehreren Messpunkten, die in einem Punktverband vorliegen, sollten hingegen die räumliche Lage der Punktinformationen bzw. die Nachbarschaften miteinbezogen werden. Dabei ist eine geometrische Modellierung zu bevorzugen (vgl. Abschnitt 3.7.4). Allgemein wirken bei der taktilen Antastung verschiedene Einflüsse, wie z. B. die Antastungsvariante, die Flächenpressung nach Hertz, der adhäsive bzw. abrasive Verschleiß oder auch die Fertigungstoleranzen der Messmittel, systematisch auf den gemessenen Wert. Entsprechende Modelle und die dazugehörigen Unsicherheitsbeiträge sind in Naab (2016) entwickelt und dargestellt. Ferner wird u. a. der Einfluss der mechanischen Filterung untersucht und die Wechselwirkung zwischen dem Radius des Messmittels und der Gestaltabweichung von Oberflächen hergestellt (vgl. Abb. 63).

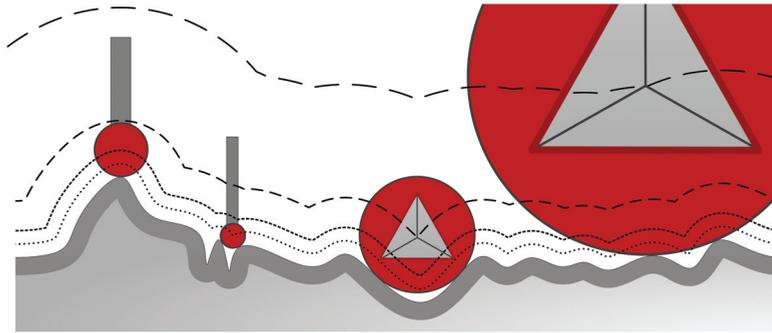


Abb. 63: Mechanische Filterwirkung beim taktilen Antasten von Freiformflächen in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser – exemplarisch für einen 3 mm und 6 mm Kugeltaster sowie für einen 0,5" bzw. 1,5" Kugelreflektor (vgl. Naab, 2016).

3.7.3 Optische Messtechnik

Zur Erfassung von Freiformflächen wird heutzutage immer häufiger die berührungslose optische Messtechnik eingesetzt, um die Oberfläche ohne direkten Kontakt zu messen. Dabei können in kurzer Zeit eine Vielzahl an Datenpunkten flächenhaft erfasst werden, wodurch die Objektgeometrie repräsentiert wird. Beispielsweise lassen sich mit Hilfe eines Messarms kombiniert mit einem Linienscanner sehr feine Gesteinsstrukturen beobachten (vgl. Abschnitt 3.8). Ein spezielles Messverfahren zur berührungslosen Streckenmessung wird vom Laser Radar der Firma Nikon Metrology (früher Metris) verwendet, mit dem Reichweiten von bis zu 60 m möglich sind, bei einer 3D-Punktunsicherheit (2σ) von rund $10\ \mu\text{m}/\text{m}$. Das Streckenmessprinzip beruht auf der Frequenzmodulation, wobei zur Auswertung des Empfangssignals lediglich eine Rückstreuung von mindestens 10^{-9} vorausgesetzt wird (vgl. Naab und Hennes, 2012; Naab, 2010). Beim optischen Abtasten einer Oberfläche treten, wie auch bei der taktilen Messtechnik, verschiedene Systematiken auf, die zu modellieren und zu quantifizieren sind. Insbesondere bei modernen Materialien wie Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV), also z. B. glas- oder kohlefaserverstärkte Kunststoffe (GFK bzw. CFK), oder bei Oberflächen auf denen ein mehrschichtiger Lack (z.B. im Fahrzeugbau) aufgebracht ist, durchdringt der Messstrahl transparente Bereiche. Die maximale Reflexion findet somit erst innerhalb des Objekts statt (vgl. Naab, 2016, 2014a, 2010). Bei Messungen mit dem Laser Radar konnten beispielsweise diese systematischen Abweichungen (Einfallswinkel 45°) mit rund 0,2 mm bei einem exemplarischen CFK-Material beziffert werden, wobei die Referenzebene mittels kartesischem Koordinatenmessgerät und taktiler Antastung ermittelt wurde (vgl. Brencher und Naab, 2010; Naab, 2010). Demgegenüber lässt sich aufgrund der entstehenden Systematik

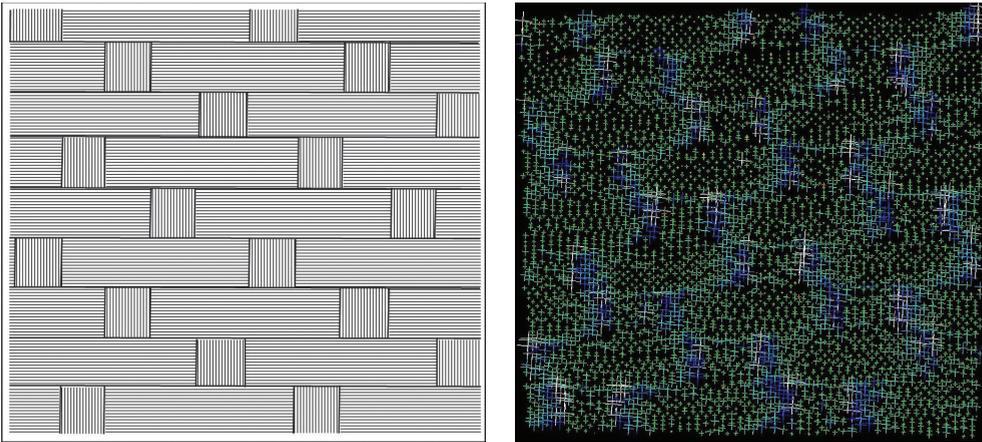


Abb. 64: Links: Schematische Darstellung des Aufbaus der Faserlagen eines CFK-Materials. Rechts: Systematische Abweichungen von der idealen Ebene aufgrund des Eindringens des Messstrahls des Laser Radars in das CFK-Material (Grün-Blau-Farbwechsel $\approx 0,2$ mm) (vgl. Brencher und Naab, 2010).

infolge der Materialeindringung auf den inneren Aufbau von FKV-Materialien schließen, deren Festigkeit durch die Faserlage geprägt ist (vgl. Abb. 64).

3.7.4 Geometrische Modellierung

Werden bei der taktilen oder optischen Antastung einer Freiformfläche mehrere Messpunkte erfasst, empfiehlt es sich, diese gemeinschaftlich zu analysieren und sie als Punktverband zu betrachten. Während allerdings bei der Vermaschung (z. B. Bildung von Dreiecksnetzen) das Messrauschen direkt abgebildet wird, lassen sich mittels Freiformgeometrien die Messdaten approximieren und glatte kontinuierliche Oberflächen erzeugen (vgl. z. B. Naab, 2013, 2012). In diesem Zusammenhang wird in Naab (2016) ein alternativer neuartiger Ansatz zur Modellierung entwickelt, bei dem direkt die Messpunkte als Kontrollpunkte eingehen. Er ist für Freiformgeometrien mit approximierendem Charakter anwendbar und weist bedeutende Vorzüge in der Anwendung auf. Repräsentieren die erfassten Messpunkte unmittelbar die Objektoberfläche (z. B. optische Antastung ohne Materialeindringung), lassen sich Freiformgeometrien direkt zur Modellierung der Oberflächenstruktur einsetzen, wohingegen bei der taktilen Antastung typischerweise parallele Geometrien beobachtet werden und die auftretenden Offsets zu korrigieren sind. Hierzu lässt sich allerdings ebenfalls die geometrische Modellierung mittels Freiformflächen nutzen, da sich die unbekannte Normalenrichtung im Berührungspunkt des Messmittels mit der Oberfläche approximieren lässt (vgl. Abb. 65). In die-

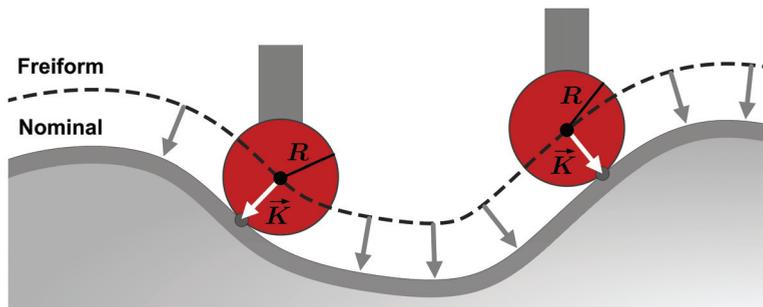


Abb. 65: Offsetkorrektur von Messpunkten mithilfe des Radius des Messmittels sowie des Korrekturvektors und Ableitung der Objektgeometrie (Nominal) infolge der geometrischen Modellierung mittels Freiformgeometrie (vgl. Naab, 2016).

sem Kontext wurde für Lasertrackermessungen das Software-Plugin FLIC erstellt, welches den Prozess der Offsetkorrektur für diskrete Messpunkte erleichtert (vgl. Hennes, 2009). Alternativ lässt sich die parallele Objektgeometrie direkt mithilfe einer Offsetgeometrie beschreiben, sodass der Zwischenschritt der Korrektur von Einzelpunkten entfällt. In Naab (2016) werden die Eigenschaften solcher Offsetgeometrien analysiert und bewertet sowie ein neuer sequenzieller Ansatz für die Erzeugung von parallelen Geometrien für vermaschte Messpunkte entwickelt, der den bisher auftretenden Systematiken entgegenwirkt.

3.8 Präzisionsmesstechnik in der Ingenieurgeologie

3.8.1 Motivation

Nicht nur im industriellen Umfeld, wie beispielsweise bei der Absteckung der Radaufhängung eines Rennwagens (vgl. Kapitel „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“, Seite 229) oder dem Einrichten eines Spektrometertanks (vgl. Abschnitt 3.10 „Präzisionsvermessungen am KATRIN-Experiment“), werden hohe Anforderungen an die Messtechnik gestellt. So sind hierbei Unsicherheiten deutlich im Submillimeterbereich gefordert und zudem ist in der Regel eine Rückführbarkeit der Messergebnisse auf die internationalen Konventionen zu gewährleisten. Vergleichbare Anforderungen stellen sich ebenfalls in der Ingenieurgeologie, die ein Teilgebiet der angewandten Geologie darstellt. Beispielsweise ist es notwendig für die Beurteilung geothermischer Reservoire oder sonstiger Lagerstätten die Durchlässigkeit des Gesteins für Fluide zu kennen und modellieren zu können. Verschiedene Modellannahmen sowie Parameter dienen hierbei

als Grundlage, die wissenschaftlich unter kontrollierten Bedingungen in Laborversuchen zu bestimmen und zu evaluieren sind. Die Präzisionsmesstechnik liefert diesbezüglich wertvolle Referenzen und Kenndaten, die aus optischen sowie taktilen Beobachtungen der Geometrie, u. a. mithilfe eines Gelenkmessarms mit Linienscanner, abgeleitet werden. Um eine größtmögliche Stabilität zu gewährleisten und geringe Messunsicherheiten zu garantieren, werden die Untersuchungen der Gesteinsproben unter definierten Bedingungen im Messlabor des Geodätischen Instituts durchgeführt. Hierbei dienen der optische Tisch, die Spannvorrichtungen sowie das Messsystem, deren Eigenschaften selbst näher untersucht sind (vgl. z. B. Starck (2015), Stövchase (2016) und Mann (2015)), als solide Basis.

3.8.2 Öffnungsweiten von Klüften

Ein wesentlicher Bestandteil für die Durchlässigkeit von Gestein für Fluide sind Klüfte die in unterschiedlichen Ausprägungen natürlich vorkommen. Diese feinen Diskontinuitäten kennzeichnen sich mitunter durch Öffnungsweiten die lediglich im Submillimeterbereich liegen und infolgedessen taktil schwer zugänglich sind und bei optischen Messsystemen zu starken Abschattungen führen. Anhand eines Versuchsaufbaus wurden verschiedene künstliche Klüfte mit definierten, rückführbaren Öffnungsweiten erzeugt, um deren Erfassbarkeit zu prüfen und die Leistungsfähigkeit des scannenden Messsystems zusammen mit den Auswerteroutinen zu evaluieren (vgl. Abb. 66, links). Zur Analyse der Messdaten wurde u. a. ein lokales Koordinatensystem

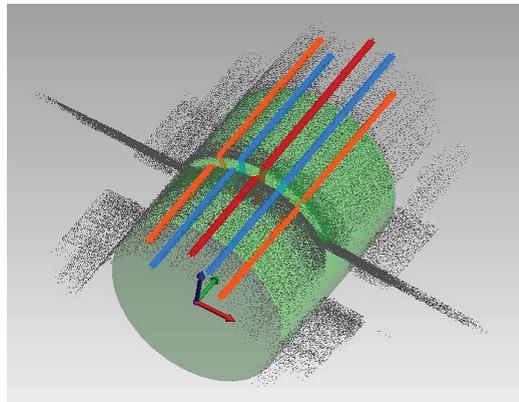
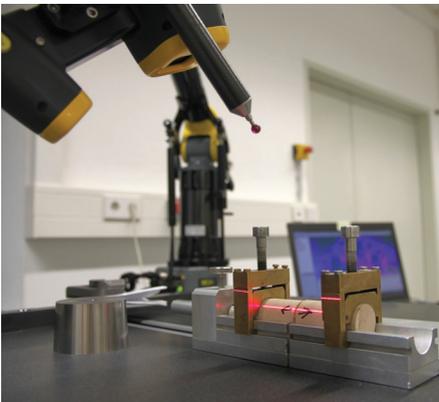


Abb. 66: Links: Erfassung einer künstlichen Kluft eines Bohrkerns aus Kalkstein mithilfe des Gelenkmessarms Nikon MCAII und des Linienscanners MMDx100. Rechts: Exemplarische Scandaten der Materialprobe mit lokalem Koordinatensystem und berechneten Messpunkten der rotierten Schnittebenen zur Bestimmung der Öffnungsweite der künstlichen Kluft (Naab, 2014a).

tensystem festgelegt sowie verschiedene Schnittebene definiert, die um die Hauptachse rotiert sind (vgl. Abb. 66, rechts) um die gesuchte Kenngröße verlässlich abzuleiten.

Aufgrund der übergeordneten Unsicherheit der erzeugten Klüfte konnte ein echter Soll-Ist-Vergleich mit den berechneten Öffnungsweiten aus den Scandaten erfolgen. Es zeigte sich, dass die Weiten der Klüfte im Millimeterbereich, wie auch im Submillimeterbereich, mit wenigen zehn Mikrometern Abweichung zuverlässig bestimmbar sind und eine minimale Öffnungsweite von kleiner 200 μm zu erfassen ist (Hale, 2014).

Bei großflächigen Analysen von Gesteinsformationen ist es möglich mit dem Messarm und Linienscanner ebenfalls im Außenbereich vor Ort zu messen, da die Messsysteme portabel sind und vergleichbar zu anderen geodätischen Messinstrumenten, beispielsweise über ein Festpunktfeld, die Stationierung zu ermitteln ist. Eine Alternative, berührungslos Klüfte bzw. die Gesteinsoberfläche über große Messdistanzen präzise zu erfassen, ermöglicht das Laserradar, da es eine 3D-Punktunsicherheit von rund 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ (2σ) bei einer Reichweite von bis zu 60 m bietet (vgl. z. B. Naab (2010) sowie Naab und Hennes (2012)).

3.8.3 Rauheit von Trennflächen

Neben der Öffnungsweite von Klüften spielt ebenfalls die Rauheit einer solchen Trennfläche eine wichtige Rolle. So stellt die Rauheit der Oberfläche bei dem Transport von Fluiden im Gestein ein wesentlicher Parameter dar, da sie maßgeblich die auftretende Reibung beeinflusst. Für die Modellierung des hydraulischen Verhaltens wird ähnlich wie zuvor, unter definierten Umgebungsbedingungen die Oberflächenbeschaffenheit mittels Gelenkmessarm kombiniert mit einem Laserscanner erfasst. Zur Bestimmung der Rauheit sind langwellige Systematiken wie z. B. die Formabweichung aus der erfassten Gestaltabweichung herauszufiltern. Die bisherige Definition nach DIN4760:1982 für Profilschnitte aus dem Bereich des Maschinenbaus zeigt Nachteile bei stark ausgeprägten Topografien und ausgedehnten Oberflächen, sodass eine allgemeinere Definition der Grenzwellenlänge, die die Kenngröße zur Trennung der Rauheit bildet, bestimmt wurde (vgl. Naab (2014b)). Diese neue Definition der Grenzwellenlänge ist abhängig von der auftretenden Wellentiefe und zielt auf großvolumigen Messanwendungen der LVM (Large Volume Metrology) ab. Ferner ist sie bei kleinen Wellentiefen von rund einem Mikrometer konform mit der bestehenden DIN-Norm. Infolgedessen ist diese Festlegung ebenfalls geeignet um sie im Bereich der Ingenieurgeologie für die Bestimmung der Rauheit von ausgedehnten Trennflächen im Gestein anzuwenden.

3.9 Bestimmung des Verknüpfungsvektors zwischen Raumverfahren (Local Tie)

3.9.1 Motivation

Zur Erstellung eines globalen Referenzsystems im Rahmen des Global Geodetic Observing Systems (GGOS) ist die geometrische Verknüpfung der verwendeten Raumverfahren von zentraler Bedeutung. Insbesondere die exakte räumliche Bestimmung des nicht-materialisierten, geometrischen Referenzpunktes (GRP) an VLBI-Teleskopen (vgl. Abb. 67) stellt eine herausfordernde Aufgabe dar, da sie zum einen mit einer Genauigkeit von wenigen 1/10 mm gefordert wird und zum anderen der Messprozess den Teleskopbetrieb möglichst nicht stören soll. Aufgrund von gravitativen und thermischen Effekten auf das Teleskop empfiehlt sich ein entsprechendes Monitoring des unzugänglichen GRP's in einem lokalen Netz, mit welchem die übrigen, ko-lokierten Raumverfahren ebenfalls zu verknüpfen sind.

3.9.2 Methodik

Der GRP eines VLBI-Teleskops kann in erster Näherung als der Schnittpunkt der Primärachse und der Sekundärachse betrachtet werden. Aufgrund verschiedener Abweichungen in der Realität wird der zu modellierende GRP exakter als Fußpunkt des Lotes der Sekundärachse auf die Primärachse des Teleskops definiert. Da die Achsen die jeweiligen Mittelsenkrechten von denjenigen Kreisen bilden, die durch Rotation eines Punktes um die jeweilige Achse entstehen, lässt sich ihre räumliche Lage durch terrestrische Vermessung derartiger Punkte



Abb. 67: Radioteleskop Wettzell.

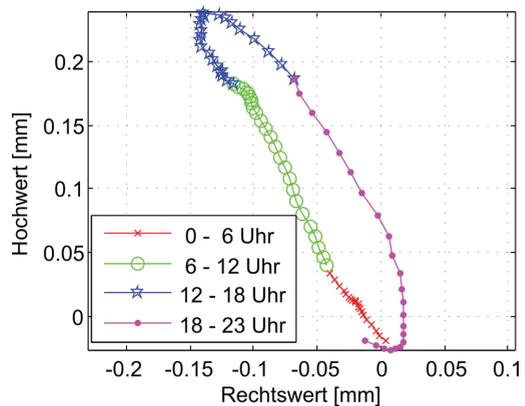


Abb. 68: Tagesverlauf des geometrischen Referenzpunktes des Radioteleskops Wettzell.

festlegen. Die entscheidende Idee ist, die "natürlichen" Rotationen des Teleskops im üblichen Messbetrieb zu nutzen, um die Punktpositionen zu erzeugen. Dies setzt einen flexiblen Messaufbau voraus, der dem Arbeitsplan des Teleskops folgt. Aus diesem Konzept ergaben sich folgende Forschungsfragen, die inzwischen gelöst wurden:

- Modellierung des Referenzpunktes anhand der Teleskopbewegung (Lösler, 2008, 2009b,a)
- Modellierung der Teleskopbewegung unter Berücksichtigung des Quasarbeobachtungsplans (Lösler und Eschelbach, 2009)
- Optimierung des ingenieurgeodätischen Beobachtungsprozesses zur Rekonstruktion der Kreistrajektorien, wobei sich folgende Teilfragen ergeben:
 - Optimierung der Zielmarkenposition (Eschelbach, 2003)
 - Optimierung des Verfahrens (zeit- und personalaufwändiger Vorwärtseinschnitt gegenüber polaren, kontinuierlichen Verfahren mit der Notwendigkeit der Reflektornachführung), vgl. z.B. (Hennes u. a., 2004; Hennes und Eschelbach, 2004)
 - Eigenschaften der Lasertrackers bei Betrieb außerhalb der Gebrauchslage (liegend) (Lösler und Haas, 2009)
- Spezifische Artefakte unterschiedlicher Ausgleichsalgorithmen und -programme (Lösler und Bähr, 2010; Lösler und Nitschke, 2010; Herrmann u. a., 2011)
- Reduktion der Refraktionseinflüsse (Lösler u. a., 2010)
- Berücksichtigung der thermischen und gravitativen Verformung (Lösler u. a., 2010)
- Übertragbarkeit der Konzepte auf andere Teleskope sowie auf andere Ko-Lokationsstationen.

3.9.3 Realisierung

Die messtechnischen Umsetzungen fanden an den Radioteleskopen in Wettzell (RTW) und in Onsala, Schweden, statt. Diese besitzen eine Montierung mit Stehachse (Primärachse) und Elevationsachse (Sekundärachse).

In einer ersten Kampagne konnte der Referenzpunkt anhand von rund 600 Punkten mit einer Genauigkeit besser als 0,3 mm je Koordinate bestimmt sowie eine Stehachsschiefe und -exzentrizität und die Nicht-Orthogonalität der Steh- und Elevationsachse nachgewiesen werden (Eschelbach und Haas, 2003). Die Modellierung der Referenzpunktposition in Abhängigkeit der Teleskoporientierung erfolgte vektoriell und erlaubt die Berechnung von Steh- und Elevationsachsschiefe sowie deren Exzentrizität (Lösler, 2008). Dieses Modell wurde bei

der Bestimmung der Referenzpunkte an den Radioteleskopen in Wettzell sowie in Onsala eingesetzt und hat sich inzwischen etabliert.

Zur permanenten Überwachung wurde das Monitoringsystem HEIM-DALL entwickelt, das die internetbasierte Abfrage der örtlichen Daten (einschließlich meteorologischer Sensoren) sowie der berechneten Bewegungsraten erlaubt. Mit ihm konnte eine Bewegung des Referenzpunktes des RTW von 0,3 mm mit täglicher Periode signifikant festgestellt und eine Korrelation zur thermischen Verformung festgestellt werden (vgl. hierzu Abb. 68 und (Lösler u. a., 2010)). Um die gravitative Verformung insbesondere des Parabols, die ebenfalls die Lage des Referenzpunktes beeinflusst, artgerecht beschreiben zu können, ist eine durchgreifende Bauwerksmodellierung unter Einbeziehung von Materialparametern und Modellen der Kontinuumsmechanik erforderlich, wobei erste Erfahrungen im Rahmen einer Diplomarbeit bei der Modellierung der Linearmessbahn PHIL des GIK gesammelt wurden (Günther, 2009).

3.10 Präzisionsvermessungen am KATRIN-Experiment

3.10.1 Einleitung

Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) soll mit Hilfe des **KARlsruher TRITium Neutrino Experiments (KATRIN)** die Masse des kleinsten Elementarteilchens – des Neutrinos – nachgewiesen werden. Mit bisher weltweit einmaliger Empfindlichkeit wird dabei die Energie der Elektronenstrahlung beim radioaktiven Zerfall des Wasserstoffisotops Tritium analysiert. Das Geodätische Institut führte bei der Einrichtung des Experiments eine Vielzahl hochpräziser Vermessungs- und Absteckungsarbeiten durch, deren Genauigkeitsansprüche im deutlichen Submillimeter-Bereich lagen.

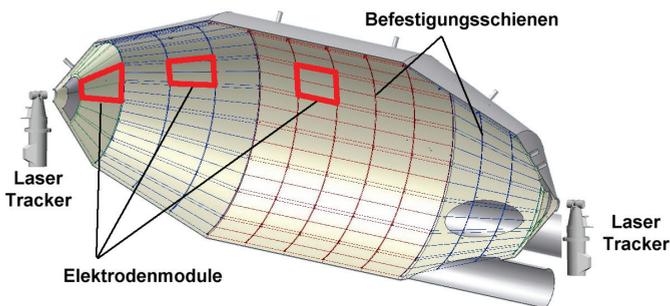


Abb. 69: Spektrometertank.

3.10.2 Arbeiten am Hauptspektrometertank

In der zentralen Apparatur dieses Experiments – dem mit einer Länge von 23 m, einem Durchmesser von 10 m und einem Volumen von 1.250 m³ weltgrößten Ultrahochvakuumtank (Abb. 69) – sollten 248 vorgefertigte hochempfindliche Elektrodenmodule eingebaut werden.

Für die Befestigungsbolzen dieser Module (Abb. 70) sollten die Abweichungen in Position und Orientierung gegenüber den Planungsdaten mit einer Genauigkeit von wenigen 1/10 mm festgestellt werden. Zur Vermessung der Bolzen wurden Adapter entwickelt und getestet, die es ermöglichen, mit Hilfe einer "Vektor-Bar" ähnlich dem Prinzip eines Kanalmeßstabes die Position eines unzugänglichen Punktes sowie die Raumrichtung des Bolzens mit Hilfe eines Lasertrackers zu bestimmen. Die Abweichungen der Bolzenspitzen von ihren Soll-Positionen betragen bis zu 20 mm bei einer Standardabweichung von 0,3 mm für die Punktlage (Juretzko, 2009, 2010).

An diesen Befestigungsbolzen wurden – unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Ablage von den Planungsdaten – 18 Doppelschienen montiert, die zur Aufnahme der vorgefertigten Elektrodenmodule dienen. Zur Vermessung der Schienen wurde die Möglichkeit zur kinematischen Erfassung von Positionen mit Hilfe eines Lasertrackers genutzt. Es wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem Teilbereiche der Schiene durch Verschieben einer auf einem Schlitten montierten Vektor-Bar erfasst werden können. Dazu wurde ein "Vektor-Schlitten" (Abb. 71) gefertigt, der die Vektor-Bar über die Schienen gleiten lässt.

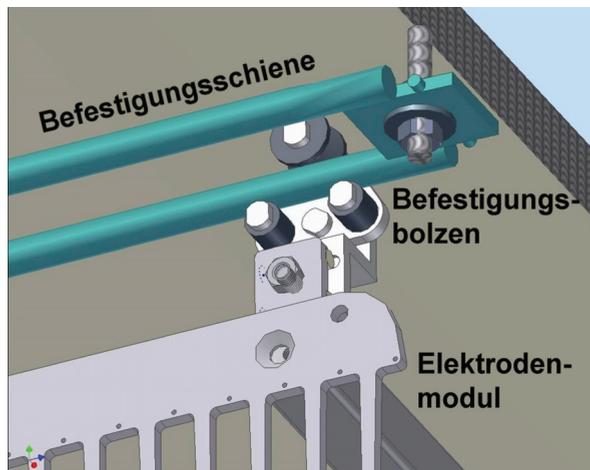


Abb. 70: Befestigung der Module.

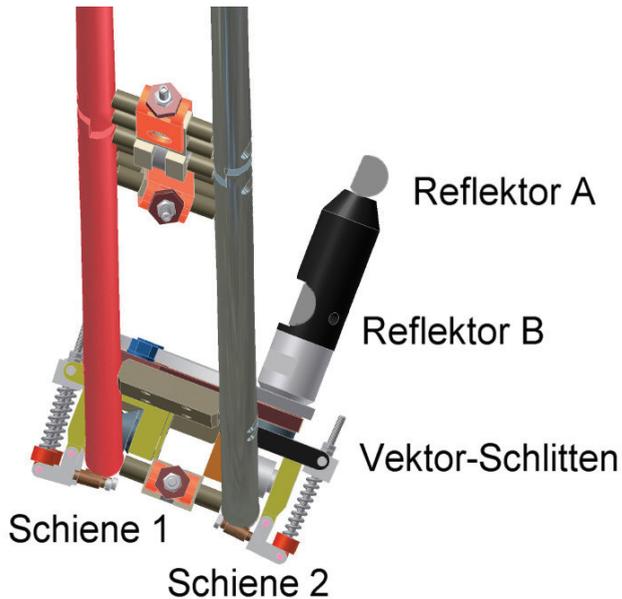


Abb. 71: Vektor-Schlitten mit Vektor-Bar.

Zur Bestimmung der Schienenachse wurde der Vektor-Schlitten zweimal entlang der zu vermessenden Schiene verschoben. Dabei wurden mit dem Lasertracker nacheinander die Spuren der beiden Reflektoren A und B aufgezeichnet. Eine Methode zur Berechnung der extrapolierten Punkte der Schienenachse lag darin, jeweils einen Punkt der Spur A und einen der Spur B einander zuzuordnen. Als Zuordnungskriterium galt die möglichst kleine Differenz zum bekannten (mechanischen) Abstand der Reflektoren A und B (vgl. Abb. 72). Bei der alternativen Methode, der Extrapolation aus der Kegelspitze, geht man davon aus, dass sich die Vektor-Bar beim Verschieben des Vektor-Schlittens aufgrund ihrer (konstanten) Schiefstellung gegenüber der Kreisebene auf einem Kegelmantel bewegt (Abb. 73). Die Reflektoren A und B des Vektor-Schlittens beschreiben dann die Spuren A und B, die ihrerseits Teil des Kegelmantels "Spurenkegel" sind. Extrapoliert man die Verbindung von der Kegelspitze des Spurenkegels zu einem der Reflektoren um das Extrapolationsmaß, so ergibt sich die Spur "Ex", die theoretisch in der Mitte der zu bestimmenden Schiene liegen sollte. Die Ergebnisse beider Auswerteverfahren unterschieden sich nur um wenige 1/100 mm. Insgesamt sind auf die zuvor beschriebene Weise 18 Doppelringe vermessen worden. Die Abweichungen zur Soll-Position lagen dabei bis auf wenige Ausnahmen unter 1 mm.

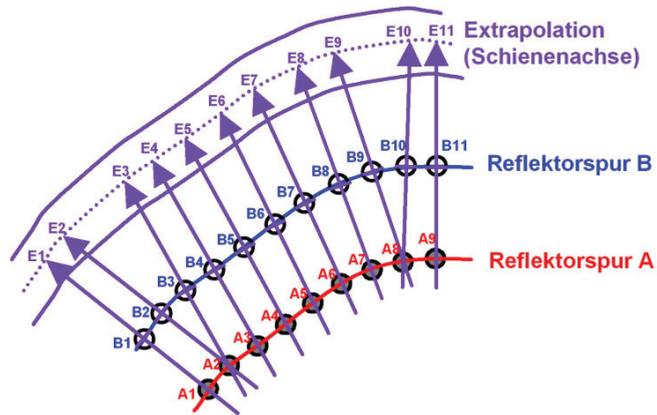


Abb. 72: Zuordnungsmethode.

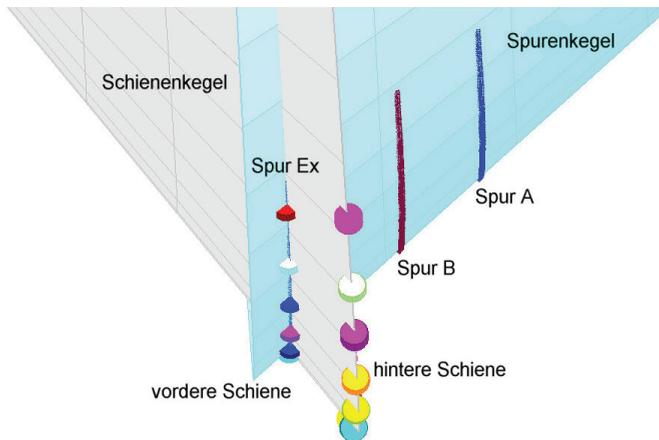


Abb. 73: Spurenkegel-Methode.

3.10.3 Posenbestimmung eines Magnetometers

Eine weitere Aufgabe bestand darin, die Position und Ausrichtung eines Magnetfeldsensors (Magnetometer) innerhalb des Tanks zu vermessen.

Mit Hilfe dieses Sensors sollte die Auswirkung eines künstlich erzeugten Magnetfelds an verschiedenen Positionen im Tank bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurde eine Plattform gefertigt, auf der das Magnetometer sowie vier 1,5"-Corner-Cube-Reflektoren (p1 bis p4)

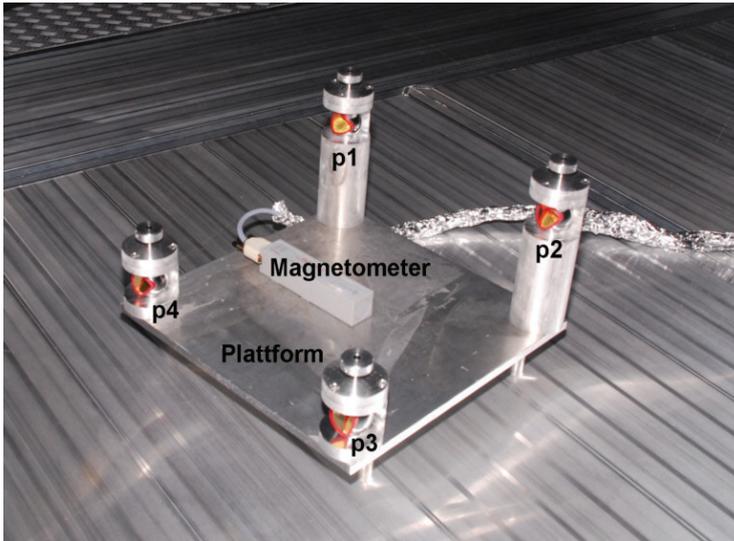


Abb. 74: Magnetometer-Plattform.

montiert werden konnten (Abb. 74). Über die Achsen des Magnetometers, die durch das Gehäuse definiert sind, wurde das Plattform-Koordinatensystem definiert.

Die Plattform wurde auf 46 verschiedenen Stellen innerhalb des KATRIN-Tanks positioniert und die 3D-Koordinaten der durch die Reflektoren definierten Passpunkte p1 bis p4 mit dem Lasertracker bestimmt (Abb. 75).

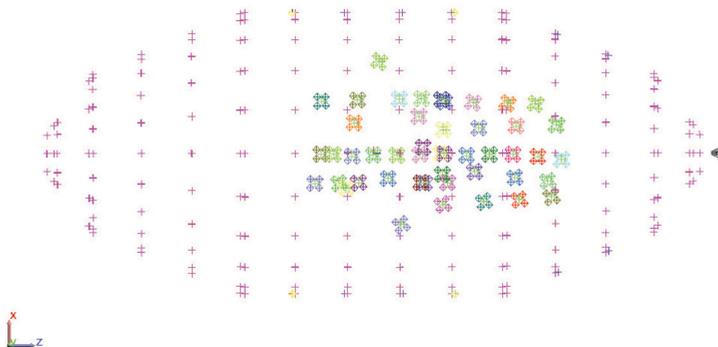


Abb. 75: Positionen der Magnetometer-Plattform (Grundriss).

3.11 Kooperierende Roboter

3.11.1 Motivation

Im Sonderforschungsbereich Transregio 10 wurden vom Institut für Produktionstechnik (wbk) des KIT Konzepte für eine Prozesskette zur flexiblen Herstellung dreidimensional gerundeter Aluminium-Strangpressprofile untersucht. Ein zentrales Element in dieser Kette ist eine Führ- und Abtrennvorrichtung, welche die Verformung der Profile vornimmt, noch während diese die Strangpresse verlassen (Abb. 76). Die besondere Herausforderung dabei liegt in der Synchronisierung der daran beteiligten Werkzeuge. Das GIK unterstützte das wbk unter anderem in der Prüfung der kinematischen Eigenschaften eines Industrieroboters.

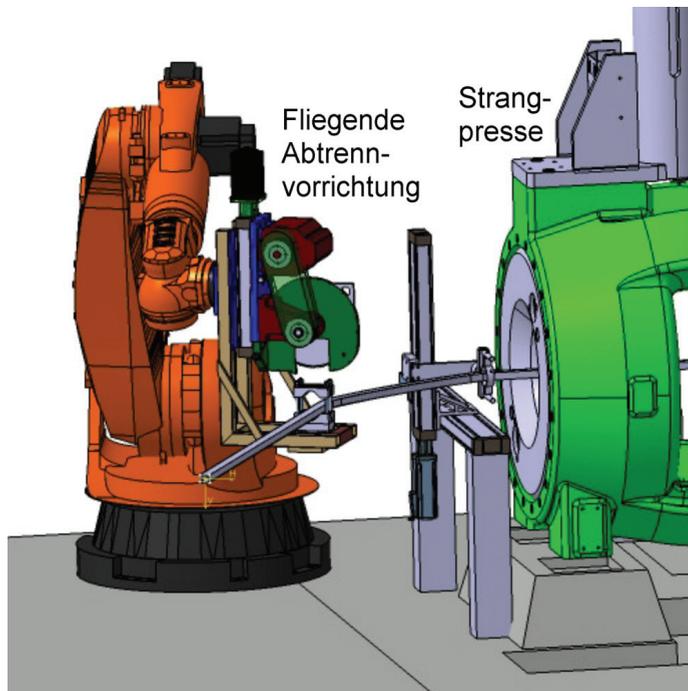


Abb. 76: Industrieroboter mit Strangpresse.

3.11.2 Messungen

Das Ziel der durchgeführten Überwachung lag darin, zu überprüfen, wie genau eine in einzelne Takte aufgeteilte Bewegung von der Robotersteuerung umgesetzt wird. Dazu wurde die vermeintlich einfache Bewegung einer geraden Linie generiert. Das Werkzeugzentrum des Roboters, auch "Tool Center Point" (TCP) genannt, sollte sich nach einer Beschleunigungsphase von 0,6 Sekunden mit einer Geschwindigkeit von 6 mm/s geradlinig über eine Länge von 2 m bewegen. Weil bei dem untersuchten Robotertyp dabei alle Gelenke beteiligt sind, ist zu erwarten, dass sich etwaige Unzulänglichkeiten in den Gelenken bzw. der Steuerung des Roboters in nicht linearer Form auf die Bewegung auswirken. Die Roboterbewegung wurde mit Hilfe eines Lasertrackers Leica LTD500, der von der Robotersteuerung getriggert wurde, raumzeitlich mit einer Taktrate von 250 Hz erfasst. Insgesamt wurden zehn Messreihen mit identischen Steuerungsparametern durchgeführt.

3.11.3 Ergebnisse

Die Abweichungen von den Soll-Positionen betragen maximal 0,2 mm in der Seitenkomponente und 0,5 mm in der Höhenkomponente wobei insbesondere in der Anfangsphase Schwingungen von 5 Hz zu beobachten waren, die auf die Elastizität der Roboterstruktur zurückzuführen sind. Diese sind in den Abbildungen 77 und 78 gut zu erkennen. Hervorzuheben

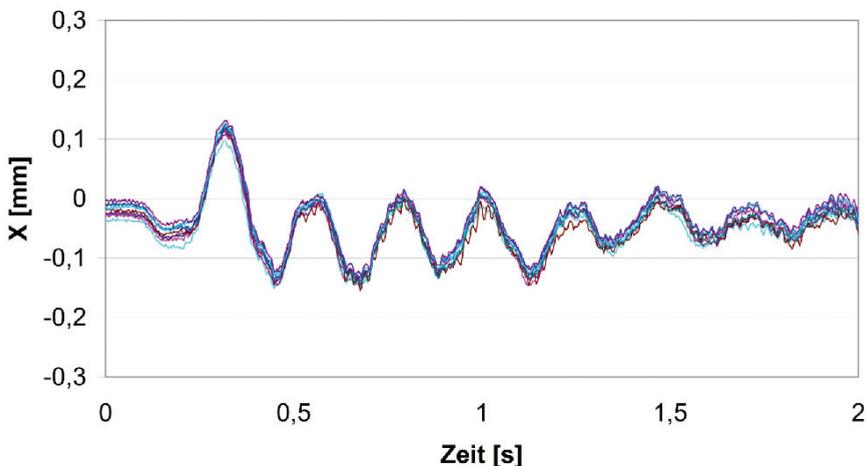


Abb. 77: Seitliche Abweichung.

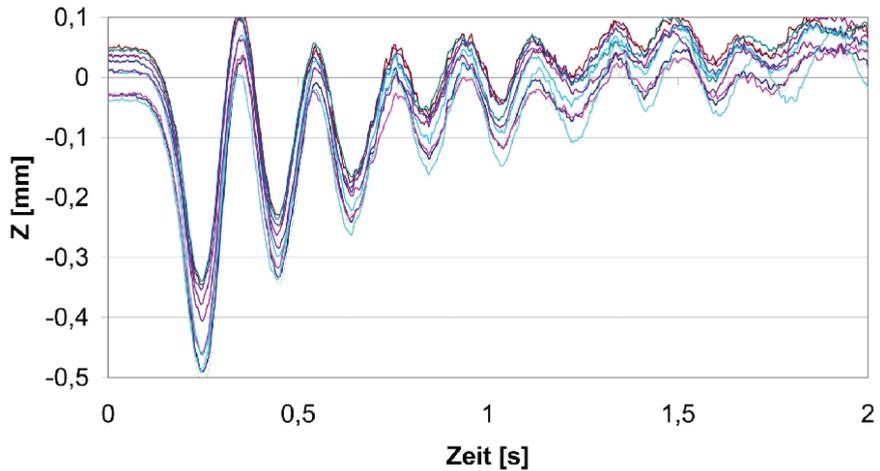


Abb. 78: Höhenabweichung.

ist die extrem hohe Wiederholgenauigkeit der einzelnen Positionen mit Abweichungen von maximal 0,06 mm in der Seiten- und Höhenkomponente in Bezug auf den Mittelwert aus zehn Messungen.

Die absoluten Abweichungen in der Längskomponente betragen bis zu 6 mm und lassen sich durch die Analyse des Geschwindigkeitsverlaufs erklären, der wiederum hoch reproduzierbar

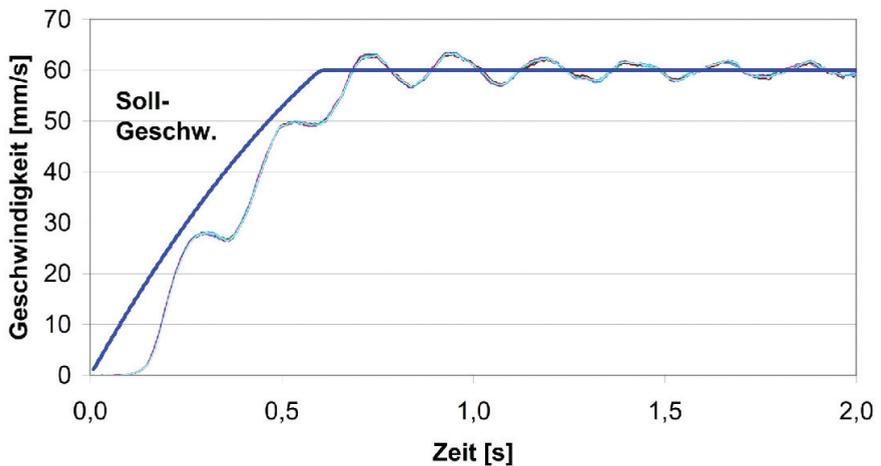


Abb. 79: Geschwindigkeiten.

war. Deutlich zu erkennen ist, dass die Bewegung aufgrund von Totzeiten und Schleppfehlern erst mit einer gewissen Verzögerung einsetzt. Die Soll-Geschwindigkeit wird beim Anfahren des Roboters aus dem Stillstand nach etwa 0,7 Sekunden erreicht (vgl. Abb. 79). Somit "hinkt" der Roboterarm seiner Sollposition von Anfang an um fast 6 mm hinterher (siehe Juretzko und Hennes, 2008; Fleischer u. a., 2008; Hennes und Juretzko, 2008; Herrmann u. a., 2010; Juretzko u. a., 2008).

3.12 Entwicklung eines Low-Cost-Systems zur hochpräzisen Posenbestimmung

3.12.1 Motivation

Der Arbeitsbereich von Nahbereichsscannern ist für eine Reihe von Einsatzgebieten zu klein oder das Vermessungsprojekt verlangt die Verknüpfung von mehreren gescannten Details, die räumlich getrennt liegen. Da die üblichen Methoden der Georeferenzierung nicht immer effizient sind, besteht Bedarf an einem Adapter für Präzisions-Nahbereichsscanner, der in Verbindung mit einem Lasertracker die Pose (Lage und Orientierung) in kurzer Zeit festlegt, wobei auf die Orientierungsmessung durch aufwändige Messmittel, wie der Leica T-Cam verzichtet werden soll.

3.12.2 Konzept und Realisierung

Das Konzept sieht vor, einen Adapter zu entwickeln, der mit unterschiedlichen beweglichen Objekten verbunden werden kann, um deren Pose zu bestimmen. Dieser Adapter für Trackingfähige Optische Messsysteme (A-TOM) trägt einen Retroreflektor. Dieser wird auf einer kreisförmigen Trajektorie geführt und von einem polaren Messsystem (Lasertracker) beobachtet. Aus der Trajektorie können die sechs Parameter der Pose mit zwei Methoden abgeleitet werden:

1. **Formschätzung:** Fünf der gesuchten sechs Parameter ergeben sich aus der Schätzung der Kreisform und der räumlichen Lage und Orientierung des Kreises, der sechste ergibt sich aus dem Phasenwinkel.
2. **Transformation:** Die sechs gesuchten Parameter werden unmittelbar aus der Transformation der Punkte im A-TOM-System auf die mit dem polaren Messsystem erfassten Punkte erhalten.

Beide Methoden setzen voraus, dass die durch Messung ermittelten Kreispunkte durch Triggersignale dem Rollwinkel (Phasenwinkel) zugeordnet werden.

A-TOM wurde in Form eines Dreharms mit einem Durchmesser von 160 mm umgesetzt, der mit verschiedenen Retroreflektoren und entsprechenden Ausgleichsgewichten bestückt werden kann (Abb. 80). Der Antrieb erfolgt durch einen Schrittmotor, auf dessen Motorwelle ein Winkelencoder montiert ist. Eine zusätzliche Ableseeinheit überträgt die Signale des Winkelencoders als Trigger an das polare Messsystem, hier ein Leica AT901 Lasertracker. Prinzipiell sind auch andere polare Messsysteme für die Beobachtung der Trajektorie geeignet. Die Komponenten von A-TOM erfüllen mit einem Anschaffungswert von etwa 500 Euro den Low-Cost-Anspruch, die Fertigung erfolgte in der mechanischen Werkstatt des GIK.

3.12.3 Erprobung

Für die Erprobung wurden Leica Lasertracker verwendet, um der hohen Fertigungsgenauigkeit Rechnung tragen zu können. Erste Ergebnisse finden sich in Hennes und Richter (2008, 2009), woraufhin Modifikationen erfolgten.

Die Positionswiederholgenauigkeit ist nun im Arbeitsbereich des verwendeten Reflektors und bis 15 m kleiner als $45\ \mu\text{m}$, diejenige der Orientierung ist entfernungsabhängig ($10\ \mu\text{rad}$ bis maximal $80\ \mu\text{rad}$ für Gier- und Nickwinkel sowie bis $600\ \mu\text{rad}$ für den Rollwinkel). Im Vergleich zur kommerziellen T-Probe, die das teure T-Cam-System voraussetzt, ist A-TOM (unabhängig von der Modellierungsmethode) hinsichtlich der Position bis zu einer Entfernung von 15 m konkurrenzfähig, bei den Orientierungswinkeln bis zu etwa 10 m. Dabei liefert die Formschätzung bei Gier- und Nickwinkeln kleinere Variationen als der Transformationsansatz. Die Abweichungen zwischen A-TOM und T-Probe übersteigen die Spezifikationen der T-Probe für den Rollwinkel etwa um Faktor 2 und liegen für die anderen beiden Orientierungsparameter innerhalb der Spezifikationen der T-Probe (Herrmann, 2016).

3.12.4 Zukünftige Arbeiten

Für den statischen Einsatz kann das entwickelte Funktionsmuster (vgl. Abb. 80) als eine Alternative zum kommerziellen System angesehen werden. Ausstehend ist die Adaption an einen Nahbereichslaserscanner, wobei hier die Herausforderung besteht, unmittelbar an die Trägerkomponente des optischen Systems des Scanners zu adaptieren, da alle übrigen Baukomponenten nicht die erforderliche mechanische Stabilität liefern. Eine weitere Aufgabe

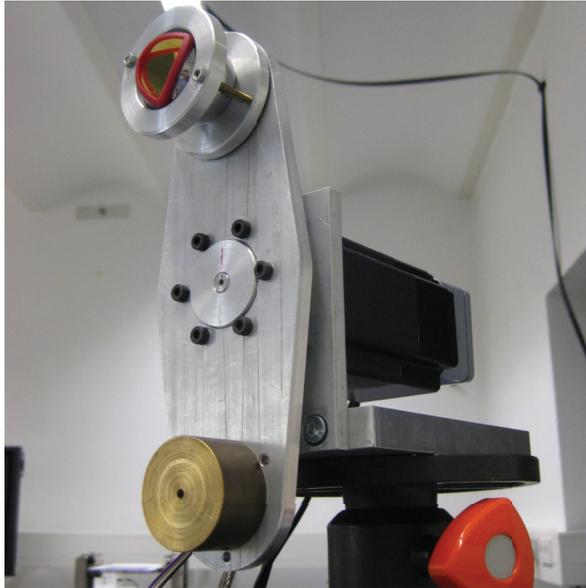


Abb. 80: Funktionsmuster von A-TOM: oben: Reflektor, unten: Ausgleichsgewicht, im hinteren Teil: Antrieb und Encoder.

wird in der integrierten Modellierung des bewegten Adapters gesehen, die Forschungsfrage wird die Integration von Vorinformation über die Bayes-Theorie beinhalten.

3.13 Refraktion

3.13.1 Motivation

Die Korrektur systematischer Verfälschungen geodätischer Beobachtungen durch Refraktion beschäftigt die Forschung schon seit langem, vgl. auch Hennes (2002) und Brunner und Hennes (2014). Der Schwerpunkt der Forschung am GIK liegt auf den Richtungsbeobachtungen, da insbesondere große Temperaturgradienten zu Abweichungen führen, die die erreichbare Instrumentengenauigkeit erheblich übersteigen (Eschelbach, 2007).

3.13.2 Turbulenztheorie – OTTM

Da die repräsentative Bestimmung des Temperaturgradienten entlang des Messstrahls nicht effizient erfolgen kann, wird die Information über den Gradienten aus der Szintillation (Intensi-

tätsfluktuation) und der Richtungsfluktuation entnommen. Dabei kann sowohl das EDM-Signal bezüglich Intensität und Phase ausgewertet werden und/oder auch die Richtungsbeobachtung in Form des Bildtanzen und der Grauwertvariation des Videosignals. Die Modellierung basiert auf dem funktionalen Zusammenhang zwischen den genannten beiden Größen sowie dem Wärme- und Momentenfluss, der wiederum den gesuchten Temperaturgradienten bestimmt. Dieser Zusammenhang wird im OTTM abgebildet, dem Optical Turbulent Transfer Model (Weiss u. a., 2002). Für geodätische Anwendungsbereiche wurde das Model verfeinert und mittels der aufwändigen lokalen Temperaturgradientenmessung verifiziert, beides beschrieben in Eschelbach (2009).

3.13.3 Praktische Aspekte

Mit Feldprüfverfahren nach ISO 17123 soll die Einsatztauglichkeit des verwendeten geodätischen Instrumentariums unter Betriebsbedingungen festgestellt werden können. Wenn der Test für höchste Genauigkeitsklassen unter – vermeintlich stabilen – Laborbedingungen für Nivelliersysteme durchgeführt wird, versagt er in der Regel aufgrund von Refraktions-einflüssen (Hennes, 2006a). Daher ist die Messung des Temperaturgradienten bei hohen Genauigkeitsforderungen empfehlenswert, sobald Richtungen beobachtet werden. Am GIK wurde daher ein mobiles Temperaturgradientenmesssystem entwickelt, das die hohen Genauigkeitsanforderungen erfüllt. Die über das OTTM berechenbare Korrekptionsgröße kann unmittelbar aus der Varianz (Intensität und Richtung bzw. Phase) der Beobachtung, sei es ein Video- oder/und ein Distanzsignal, entnommen werden und ist quasi ein Abfallprodukt der eigentlichen Richtungs- (oder auch Distanz-)beobachtung. In praktischen Tests zeigte sich eine weitgehende Korrigierbarkeit der Vertikalrefraktion. Die Forschung wird sich auf die Abhängigkeit vom Umfeld, insbesondere der lokalen Strömungsverhältnisse, konzentrieren.

Literatur

- Abd-Elmotaal, H. A., Seitz, K., Abd-Elbaky, M. und Heck, B. (2016a): Tailored Reference Geopotential Model for Africa. In: *IAG 150 Years: Proceedings of the IAG Scientific Assembly in Postdam, Germany, 2013*. Hrsg. von C. Rizos und P. Willis. Cham: Springer International Publishing, S. 383–390. DOI: 10.1007/1345_2015_84.
- Abd-Elmotaal, H. A., Seitz, K., Kühtreiber, N. und Heck, B. (2016b): Establishment of the Gravity Database AFRGDB_V1.0 for the African Geoid. In: *IGFS 2014*. Hrsg. von S. Jin und R. Barzaghi. Cham: Springer International Publishing, S. 131–138. ISBN: 978-3-319-39820-4.
- Abd-Elmotaal, H. A., Seitz, K., Kühtreiber, N. und Heck, B. (2018a): AFRGDB_V2.0: The Gravity Database for the Geoid Determination in Africa. In: *IAGS 2018*. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, S. 1–10. DOI: 10.1007/1345_2018_29. URL: https://doi.org/10.1007/1345_2018_29.

- Abd-Elmotaal, H. A., Seitz, K., Kühtreiber, N. und Heck, B. (2018b): Evaluation of the African Gravity Database AFRGDB_V1.0. In: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–6. DOI: 10.1007/1345_2017_16. URL: https://doi.org/10.1007/1345_2017_16.
- Alshawaf, F., Fuhrmann, T., Heck, B., Hinz, S., Knöpfler, A., Luo, X., Mayer, M., Schenk, A., Thiele, A. und Westerhaus, M. (2013): Integration of InSAR and GNSS Observations for the Determination of Atmospheric Water Vapour. In: *Earth Observation of Global Changes (EOGC)*. Hrsg. von J. M. Krisp, L. Meng, R. Pail und U. Stilla. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 147–162. ISBN: 978-3-642-32714-8. DOI: 10.1007/978-3-642-32714-8_10. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32714-8_10.
- Alshawaf, F., Hinz, S., Mayer, M. und Meyer, F. J. (2015): Constructing accurate maps of atmospheric water vapor by combining interferometric synthetic aperture radar and GNSS observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(4):1391–1403. DOI: 10.1002/2014JD022419. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2014JD022419>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JD022419>.
- Anderson, E. G. (1976): The effect of topography on solutions of Stokes' problem. Unisurv S-14, Report. School of Surveying, University of New South Wales, Australia.
- Bernhart, F. (2010): Eigenschaften von Kugelreflektoren. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 173 S.
- Bernhart, F. und Hennes, M. (2012): Leistungsfähigkeit eines "Reflektor 160" in Kombination mit einem Lasertracker. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012(2):63–69.
- Bertels, M. (2018): Evaluierung der Leistungsfähigkeit einer Roboter-Totalstation zur Objektverfolgung in Echtzeit. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 78 S.
- Brencher, T. und Naab, C. (2010): Vermessung von CFK-Oberflächen mit einem Laserradar. In: 3. Fortbildungsseminar "Optische Messtechnik für Anwendungen im Maschinenbau", 14.10.2010, Karlsruhe.
- Breunig, M., Borrmann, A., Rank, E., Hinz, S., Kolbe, T., Schilcher, M., Mundani, R.-P., Jubierre, J. R., Flurl, M., Thomsen, A., Donaubaue, A., Ji, Y., Urban, S., Laun, S., Vilgertshofer, S., Willenborg, B., Menninghaus, M., Steuer, H., Würsthorn, S., Leitloff, J., Al-Doori, M. und Mazroobsemnani, N. (2017): Collaborative multi-scale 3D city and infrastructure modelling and simulation. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W4*:341–352. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-341-2017. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4-W4/341/2017/>.
- Brunner, F. K. und Hennes, M. (2014): Refraktion – Rückschau auf Publikationen der letzten 25 Jahre in der AVN. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2014(4):131–140.
- Depenthal, C. (2008): A Time-referenced 4D Calibration System for Kinematic Optical Measuring Systems. In: Proceedings of the 1st Conf. Machine Control & Guidance, June 24-26, 2008, ETH Zurich, CH.
- Depenthal, C. (2009a): Entwicklung eines zeitreferenzierten 4-D Kalibriertsystems für optisch kinematische Messsysteme. *Veröffentlichungen der DGK, Reihe C*, no. 627. Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: <http://dgk.badw.de/index.php?id=12,%20http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000010086>.
- Depenthal, C. (2009b): On Analyzing Delay Times of Kinematic Optical Measuring Systems with Quaternion-Algebra. In: Grün, A., und Kahmen, H. (Hrsg.) IEEE Proceedings Eurocon, Optical 3-D Measurement Techniques IX, Vol. II, Jul. 1-3, 2009, Vienna, Austria. S. 105–114.
- Depenthal, C. (2009c): Quaternion-Based Delay Time Determination for Kinematic Optical Measuring Systems. In: IEEE Proceedings Eurocon, 18.-23. Mai 2009, Saint Petersburg, Russia. S. 1139–1144. ISBN: 978-1-4244-3861-7.
- Depenthal, C. (2010a): iGPS used as kinematic measuring system. FIG, 2010. URL: https://www.gik.kit.edu/downloads/iGPS_FIG2010_Depenthal.pdf (besucht am 06.05.2018).
- Depenthal, C. (2010b): Path Tracking with iGPS. In: Int Conf Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 15-17 Sept. 2010. S. 1–6.
- Depenthal, C. (2012): Die kinematische Leistungsfähigkeit des iGPS. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012:70–72.
- Depenthal, C. und Barth, M. (2007): Zur Leistungsfähigkeit eines zeitreferenzierten Dreharms als Prüfmittel für 4D-Messsysteme in Hochgeschwindigkeitsanwendungen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(7):244–249.
- DVW AK 3 und 4 (2017): Ein einfaches Feldprüfverfahren für Tachymeter. Fachautor: Manfred Juretzko, Karlsruher Institut für Technologie. URL: <https://www.dvw.de/merkblatt> (besucht am 21.05.2018).
- Eschelbach, C. (2003): Bestimmung des IVS-Referenzpunktes am Onsala Raumobservatorium. *Mitteilungen, DVW Baden-Württemberg e.V. Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 50(1):203–207.

- Eschelbach, C. (2007): Störanfälligkeit geodätischer Präzisionsmessungen durch lokale Temperaturschwankungen. In: Beitrag zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, 17.-20. April 2007, Graz, Österreich. IEEE Xplore, S. 169–180.
- Eschelbach, C. (2009): Refraktionskorrekturbestimmung durch Modellierung des Impuls- und Wärmeflusses in der Rauigkeitsschicht. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*, no. 2009/1. Dissertation. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. ISBN: 978-3-86644-307-5.
- Eschelbach, C. und Haas, R. (2003): The IVS-Reference Point at Onsala – High End Solution for a Real 3D-Determination. In: Schwegmann, W., und Thorandt, V. (Hrsg.) Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, BKG, Frankfurt/Leipzig. S. 109–118.
- Faller, S. (2012): Untersuchungen zur Selbstkalibrierung von Lasertrackern mit kardanisch gelagertem Spiegel. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 173 S.
- Fleischer, J., Hennes, M., Munzinger, C., Köhler, G., Juretzko, M. und Schneider, M. (2008): Genauigkeitsuntersuchungen an einer fliegenden Abtrennvorrichtung. *VDI-Z* 150(5):71–73.
- Fuhrmann, C. (2014): Numerische Untersuchungen zu den RTM-Effekten auf die Höhenanomalie. BA im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik am GIK/KIT, Karlsruhe, (unveröffentlicht).
- Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., van Leijen, F. J., Mayer, M., Westerhaus, M., Hanssen, R. F. und Heck, B. (2015): Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data. *Geophysical Journal International* 203(1):614–631. DOI: 10.1093/gji/ggv328.
- Fuhrmann, T. (2017): Surface Displacements from Fusion of Geodetic Measurement Techniques Applied to the Upper Rhine Graben Area. *Veröffentlichungen der DGK, Reihe C*, no. 773. identisch mit: KITopen der Bibliothek des Karlsruher Instituts für Technologie – KIT Scientific Publishing, <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000056073>, DOI(KIT):10.5445/IR/1000056073. Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: <https://www.dgk.badw.de/devweb.mwn.de/fileadmin/docs/c-773.pdf>.
- Fuhrmann, T., Heck, B., Knöpfler, A., Masson, F., Mayer, M., Ulrich, P., Westerhaus, M. und Zippelt, K. (2013): Recent surface displacements in the Upper Rhine Graben – Preliminary results from geodetic networks. *Tectonophysics* 602:300–315. ISSN: 0040-1951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.10.012>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004019511200666X>.
- Fuhrmann, T., Westerhaus, M., Zippelt, K. und Heck, B. (2014a): Vertical displacement rates in the Upper Rhine Graben area derived from precise leveling. *Journal of Geodesy* 88(8):773–787. ISSN: 1432-1394. DOI: 10.1007/s00190-014-0721-0. URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0721-0>.
- Fuhrmann, T., Zippelt, K. und Heck, B. (2014b): Historische Nivellements aus Preußen und Baden und ihre Bedeutung für die Bestimmung von Vertikalbewegungen im Oberrheingrabengebiet. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 139(6):389–397. DOI: 10.12902/zfv-0038-2014.
- Grombein, T. (2017a): Gravity forward modeling with a tesseroid-based Rock-Water-Ice approach – Theory and applications in the context of the GOCE mission and height system unification. *Veröffentlichungen der DGK, Reihe C*, no. 798. Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Grombein, T. (2017b): Gravity forward modeling with a tesseroid-based Rock-Water-Ice approach – Theory and applications in the context of the GOCE mission and height system unification. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*, no. 2017,1. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. DOI: 10.5445/KSP/1000068500.
- Grombein, T., Luo, X., Seitz, K. und Heck, B. (2014a): A wavelet-based assessment of topographic-isostatic reductions for GOCE gravity gradients. *Surveys in Geophysics* 35(4):959–982. DOI: 10.1007/s10712-014-9283-1.
- Grombein, T., Seitz, K., Awange, J. L. und Heck, B. (2012): Detection of hydrological mass variations by means of an inverse tesseroid approach. EGU-Tagung, Wien, 22.-27. April 2012.
- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2013): Optimized formulas for the gravitational field of a tesseroid. *Journal of Geodesy* 87(7):645–660. DOI: 10.1007/s00190-013-0636-1.
- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2014b): Incorporating Topographic-Isostatic Information into GOCE Gravity Gradient Processing. In: *Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and future missions: GEOTECHNOLOGIEN Science Report No. 20*. Hrsg. von F. Flechtner, N. Sneeuw und W.-D. Schuh. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 95–101. DOI: 10.1007/978-3-642-32135-1_12.
- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2014c): Topographic-isostatic reduction of GOCE gravity gradients. IAG Symp, vol 139, 349-356. DOI: 10.1007/978-3-642-37222-3_46.

- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2015): RWI_TOPO_2015: An update of the Rock-Water-Ice topographic gravity field model of the Earth up to degree and order 2190. IUGG, Prague, 22. Juni-02. Juli 2015.
- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2016): Height System Unification Based on the Fixed GBVP Approach. In: Rizos, C., und Willis, P. (Hrsg.) IAG 150 Years, Cham: Springer International Publishing, S. 305–311. ISBN: 978-3-319-30895-1.
- Günther, A. (2009): Eigenschaften der Linearmessbahn im kinematischen Betrieb. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 145 S.
- Hale, S. (2014): Bestimmung der Öffnungsweite von Klüften durch 3D-Laserscanning – Anwendbarkeit und Grenzen. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe, Institut für Angewandte Geowissenschaften Karlsruhe – KIT.
- Härter, N. (2016): Rekonstruktion von äquivalenten Wassersäulen aus einem inversen Tesseroidansatz in einer closed-loop Simulation. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 64 S.
- Heck, B. und Seitz, K. (2007): A comparison of the tesseroid, prism and point-mass approaches for mass reductions in gravity field modelling. *Journal of Geodesy* 81(2):121–136. DOI: 10.1007/s00190-006-0094-0.
- Hennes, M. (2002): Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung. *fub – Flächenmanagement und Bodenordnung* 2002.
- Hennes, M. (2006a): Das Nivelliersystem-Feldprüfverfahren nach ISO 17123-2 im Kontext refraktiver Störeinflüsse. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 119(3):85–94.
- Hennes, M. (2006b): Zur Flächenrückführung mit Lasertrackern. In: Beitrag zum 72. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning (TLS 2006), vol. 51. 09.-10. November 2006, Fulda. Schriftenreihe des DVW, S. 201–212.
- Hennes, M. (2007a): Flächenerfassung mit Lasertrackern als Alternative zu scannenden Verfahren. In: 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag, Berufliche Weiterbildung (BWB) Industriemesstechnik, TU Dresden, Geodätisches Institut, 01.06.2007. S. 59–65.
- Hennes, M. (2007b): Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(4):136–146.
- Hennes, M. (2009): Freiformflächenerfassung mit Lasertrackern – eine ergonomische Softwarelösung zur Reflektoroffsetkorrektur. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2009(5):188–194.
- Hennes, M. (2010): Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik. In: Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswertverfahren, vol. 61. 93. DVW-Seminar, 10./11. Juni 2010, Hannover. S. 239–252. ISBN: 978-3-89639-742-3.
- Hennes, M. (2013): Zum Umgang mit Unsicherheiten bei geodätischen Mess- und Auswertverfahren. In: Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswertverfahren, vol. 71. Beiträge zum 125. DVW-Seminar, 24./25.6.2013, Hannover. Wissner-Verlag, S. 25–46. ISBN: 978-3-89639-917-5.
- Hennes, M. und Eschelbach, C. (2004): New Technologies For The Real 3D Reference Point Determination. In: Proc. 3rd IVS General Meeting, 9.-11.2.2004, Ottawa/Canada. URL: https://www.gik.kit.edu/downloads/hennes_eschelbach_2004_pr.pdf (besucht am 29.06.2018).
- Hennes, M., Haas, R. und Eschelbach, C. (2004): Industriemesstechnik zur Qualitätssteigerung von VLBI-Ergebnissen. In: Ingensand, H. (Hrsg.) XIV, Kurs für Ingenieurvermessung, 15.-19.3.2004, Zürich. S. 107–118.
- Hennes, M. und Heister, H. (2007): Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(11-12):375–383.
- Hennes, M. und Juretzko, M. (2008): Measuring the motion – Synchronizing a laser tracker for high-accuracy handling tasks. *Journal of CMSC* 4:23–28.
- Hennes, M. und Richter, E. (2008): A-TOM – eine neuartige instrumentelle Lösung für die hochpräzise und echtzeitnahe 6DOF-Bestimmung. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 115(8-9):301–310.
- Hennes, M. und Richter, E. (2009): Ein neuartiges Verfahren zur 6DOF-Bestimmung. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. S. 254–261.
- Hennes, M., Urban, M. und Wursthorn, S. (2014): Zur Synchronisierung von Multi-Sensor-Systemen – Grundlagen und Realisierungen. In: Beiträge zum 138. DVW-Seminar, vol. 75. 18./19. September 2014, Hamburg.
- Herrmann, C., Hennes, M., Juretzko, M., Schneider, M. und Munzinger, C. (2010): Positioning and Synchronization of Industrial Robots. In: Mautz, R., Kunz, M., und Ingensand, H. (Hrsg.) Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 18./19. September 2014, Hamburg. IEEE Xplore, S. 436–440.
- Herrmann, C., Lösler, M. und Bähr, H. (2011): Comparison of Spatial Analyzer and Different Adjustment Programs. In: Proc. 1st International Workshop on Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems, 13.-15. April

- 2011, Garching, Munich. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000027924> (besucht am 28.02.2013).
- Herrmann, C. (2016): Entwicklung eines trackingfähigen optischen Messsystems zur Posenbestimmung. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KITopen. 174 S. DOI: 10.5445/IR/1000063757.
- ICGEM (2018): International Centre for Global Earth Models. URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/home> (besucht am 12.01.2018).
- Juretzko, M. und Richter, E. (2009): Geometrical survey of compact antenna test ranges using laser tracker technology. In: Proceedings 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 12th FIG Symposium on Deformation Measurement.
- Juretzko, M. (2009): Positionsbestimmung der Elektrodenmodule des KATRIN-Experiments mit Hilfe eines Lasertrackers. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 116(6):220–230.
- Juretzko, M. (2010): Hochpräzise Vermessung ringförmiger Befestigungsschienen der Neutrinowaage KATRIN. In: Wunderlich, T. (Hrsg.) *Ingenieurvermessung* 10, 16. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, 23.-26.2.2010, München. Herbert Wichmann Verlag, S. 357–368.
- Juretzko, M. und Hennes, M. (2008): Monitoring of the spatiotemporal movement of an industrial robot using a laser tracker. In: Proceedings of the 1st Conf. Machine Control & Guidance, June 24-26, 2008, ETH Zurich, CH. S. 315–320.
- Juretzko, M., Hennes, M., Schneider, M. und Fleischer, J. (2008): Überwachung der räumzeitlichen Bewegung eines Fertigungsroboters mit Hilfe eines Lasertrackers. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 115(5):171–178.
- Kern, J. (2014): Untersuchung der kinematischen Eigenschaften des Leica Absolute Trackers AT401. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT.
- Kubaneck, J., Richardson, J. A., Charbonnier, S. J. und Connor, L. J. (2015a): Lava flow mapping and volume calculations of the 2012-13 Tolbachik, Kamchatka fissure eruption using bistatic TanDEM-X InSAR. *Bulletin of Volcanology* 77(106):1–13. DOI: 10.1007/s00445-015-0989-9.
- Kubaneck, J., Westerhaus, M., Heck, A., Raible, B. und Heck, B. (2018): TanDEM-X in volcanology: Achievements and perspectives. In: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR 2018; Eurogress AachenAachen; Germany; 4 June 2018 through 7 June 2018, *Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR*, vol. 2018-June. VDE-Verlag, Berlin/Offenbach, S. 179–184. ISBN: 978-3-8007-4636-1.
- Kubaneck, J., Westerhaus, M. und Heck, B. (2013a): Application of TanDEM-X interferometry in volcano monitoring. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 15, EGU2013–6937.
- Kubaneck, J., Westerhaus, M. und Heck, B. (2017): TanDEM-X time series analysis reveals lava flow volume and effusion rates of the 2012–13 Tolbachik, Kamchatka fissure eruption. *Journal of Geophysical Research* 122(10):7754–7774. DOI: 10.1002/2017JB014309.
- Kubaneck, J., Westerhaus, M. und Heck, B. (2013b): Topographic changes at Volcán de Colima observed by double differential InSAR using TanDEM-X. In: Proc. ESA Living Planet Symposium 2013, 9-13 September 2013, Edinburgh, UK.
- Kubaneck, J., Westerhaus, M. und Heck, B. (2013c): Volume Changes during the 2010 Merapi eruption calculated from TanDEM-X interferometry. In: General Assembly of the European Geosciences Union 2013, 07.-12. April 2013, Wien, Österreich, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 15, EGU2013-9304.
- Kubaneck, J., Westerhaus, M., Schenk, A., Aisyah, N., Brotospusito, K. S. und Heck, B. (2015b): Volumetric change quantification of the 2010 Merapi eruption using TanDEM-X InSAR. *Remote Sensing of Environment* 164:16–25. ISSN: 0034-4257. DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.027. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425715000863>.
- Lösler, M., Bähr, H. und Ulrich, T. (2016): Verfahren zur Transformation von Parametern und Unsicherheiten bei nicht-linearen Zusammenhängen. In: Luhmann, T., und Schumacher, C. (Hrsg.) *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016, Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*. S. 274–285.
- Lösler, M. (2008): Reference point determination with a new mathematical model at the 20 m VLBI radio telescope in Wettzell. *Journal of Applied Geodesy* 2:233–238. DOI: 10.1515/JAG.2008.026.
- Lösler, M. (2009a): Bestimmung des lokalen Verbindungsvektors zwischen IVS- und IGS-Referenzrahmen am Raumobservatorium Onsala (Schweden). *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 116(11-12):382–387.
- Lösler, M. (2009b): New Mathematical Model for Reference Point Determination of an Azimuth-Elevation Type Radio Telescope. *Journal of Surveying Engineering* 135(4):131–135. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000010.
- Lösler, M. und Bähr, H. (2010): Vergleich der Ergebnisse verschiedener Netzausgleichsprogramme. Hrsg. von K. Zippelt. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik / Karlsruher Institut für Technologie*,

- vol. 2010.3. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S. 205–214. ISBN: 978-3-86644-576-5. DOI: 10.5445/KSP/1000020074.
- Lösler, M. und Eschelbach, C. (2009): Evolution and obtained expertise in reference point determination at the GIK. In: Bourda, G., Charlot, P., und Collioud, A. (Hrsg.) Proceedings of the EVGA-European VLBI for Geodesy and Astrometry, 23.-24. März 2009, Bordeaux/Frankreich. S. 116–121.
- Lösler, M., Eschelbach, C., Schenk, A. und Neidhardt, A. (2010): Permanentüberwachung des 20m VLBI-Radioteleskops an der Fundamentalstation in Wettzell. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 135(1):40–48.
- Lösler, M. und Haas, R. (2009): The 2008 Local-tie Survey at the Onsala Space Observatory. In: Bourda, G., Charlot, P., und Collioud, A. (Hrsg.) Proceedings of the EVGA-European VLBI for Geodesy and Astrometry, 23.-24. März 2009, Bordeaux/Frankreich. S. 97–101.
- Lösler, M. und Nitschke, M. (2010): Bestimmung der Parameter einer Regressionsellipse in allgemeiner Raumlage. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 117(3):113–117.
- Luo, X., Heck, B. und Awange, J. L. (2013): Improving the estimation of zenith dry tropospheric delays using regional surface meteorological data. *Advances in Space Research* 52(12):2204–2214. ISSN: 0273-1177. DOI: 10.1016/j.asr.2013.09.005. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027311771300553X>.
- Mann, S. (2015): Entwicklung eines Prüfhilfsmittels für Messarme mit kombinierter Antastung. Masterarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 173 S.
- Meerländer, M. (2015): Zur Modellbildung von 6DOF-Messungen mit einem Leica Absolute-Tracker mit T-Cam. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT.
- Naab, C. (2010): Eigenschaften des Laser Radars. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 100 S.
- Naab, C. (2012): Zur Parametrisierung bei der Modellierung von Objekten mit extremen Krümmungsänderungen. In: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012, Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, 26.-27.11.2014, Fraunhofer IPM, Freiburg. Wichmann-Verlag, S. 134–145.
- Naab, C. (2013): Zur Parametrisierung bei der Modellierung von Objekten mit extremen Krümmungsänderungen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2013(3):98–106.
- Naab, C. (2014a): On the characteristics of surface scanning with high precision. MoLaS – Technology Workshop, 26.-27.11.2014, Fraunhofer IPM, Freiburg.
- Naab, C. (2014b): Präzise Oberflächenerfassung mit einem Messarm. Intergeo Kongress, Geodätische Woche Berlin, 07.-09. Oktober 2014.
- Naab, C. (2016): Beiträge zur Optimierung der Offsetkorrektur bei der taktilen Erfassung von Freiformflächen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KITopen. 190 S. DOI: 10.5445/IR/1000071109.
- Naab, C. und Hennes, M. (2012): Das Laser Radar – reflektorlose Distanzbestimmung mittels Frequenzmodulation. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012(2):48–53.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C. und Factor, J. K. (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research* 117:B04406. DOI: 10.1029/2011JB008916.
- Schenk, A. (2015): PS-Interferometrie in urbanen Räumen – Optimierte Schätzung von Oberflächenbewegungen mittels Multi-SBAS-Verfahren. *Veröffentlichungen der DGK, Reihe C*, no. 769. identisch mit: KITopen der Bibliothek des Karlsruher Instituts für Technologie – KIT Scientific Publishing, <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/3755046>. Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: <https://www.dgk.badw.de/devweb.mwn.de/fileadmin/docs/c-769.pdf>.
- Schwarz, W. und Hennes, M. (2016): Qualitätsbewertungen in der Ingenieurgeodäsie. In: *Handbuch der Geodäsie: 6 Bände*. Hrsg. von W. Freeden und R. Rummel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–32. ISBN: 978-3-662-46900-2. DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2_31-1.
- Seitz, K., Bähr, H., Wild, F., Heck, B. und Roth, K. (2005): Berechnung einer Bouguerkarte für das Saarland. Geodätische Woche, Düsseldorf, 04.-06. Oktober 2005.
- Seitz, K., Bähr, H., Wild, F., Heck, B. und Roth, K. (2008): A Bouguer gravity anomaly map for the Saarland region. EUCOR-urgent meeting.
- Seitz, K. und Heck, B. (2001): Tesseroids for the calculation of topographic reductions. Vistas for Geodesy in the New Millennium: IAG Scientific Assembly, Budapest, Hungary, September 2-7, 2001.
- Starck, C. (2015): Analyse von Störgrößen beim Einsatz eines optischen Tisches in Kombination mit einem Messarm oder Lasertracker. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT.

- Stövhase, J.-M. (2016): Analyse eines scannenden Verfahrens zur Modellierung von Kluftoberflächen. Masterarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT.
- Ulrich, T. (2012): Uncertainty Estimation for Kinematic Laser Tracker Measurements. In: Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, November 13-15, 2012, Sydney, Australien. IEEE Xplore.
- Ulrich, T. (2013): Uncertainty estimation and multi sensor fusion for kinematic laser tracker measurements. *Metrologia* 50(4):307–317. DOI: 10.1088/0026-1394/50/4/307.
- Ulrich, T. (2014): Bestimmung und Optimierung kinematischer Messunsicherheiten von Trajektorien am Beispiel des Lasertrackers. Kurs für Ingenieurvermessung, KIT.
- Ulrich, T. (2015): Uncertainty modelling of real-time observation of a moving object: photogrammetric measurements. *Metrologia* 52(2):201–213. DOI: 10.1088/0026-1394/52/2/201.
- Ulrich, T. (2016): Uncertainty Modelling of High-precision Trajectories for Industrial Real-time Measurement Applications. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*, no. 2016. Dissertation. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000060440.
- Ulrich, T. und Irgenfried, S. (2014): Uncertainty Estimation for Kinematic Laser Tracker Measurements Incorporating the Control Information of an Industrial Robot. In: Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, October 27-30, 2014, Busan, Korea. IEEE Xplore.
- Weiss, A. I., Hennes, M. und Rotach, M. W. (2002): Derivation of refractive index and temperature gradients from optical scintillometry to correct atmospherically induced errors for highly precise geodetic measurements. *Surveys in Geophysics* 2002.
- Wild-Pfeiffer, F. (2007): Auswirkungen topographisch-isostatischer Massen auf die Satellitengradiometrie. *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C*, no. 604. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, Munich, Germany.
- Wild-Pfeiffer, F. (2008): A comparison of different mass elements for use in gravity gradiometry. *Journal of Geodesy* 82(10):637–653. DOI: 10.1007/s00190-008-0219-8.

Innovationen am Geodätischen Institut

Martin Breunig, Bernhard Heck und Maria Hennes

1 Einleitung

Innovation wird am Geodätischen Institut seit Bestehen auf verschiedenen Ebenen in der Lehre und in der Forschung gelebt. In diesem Beitrag beschränken wir uns auf die Präsentation von Innovationen, deren Fokus auf den Transfer aktueller Forschungsergebnisse aus der Wissenschaft in die Praxis gerichtet ist. Wenn wir Innovation in dieser Weise verstehen, fallen hierunter Produkte und Dienstleistungen in Form von Drittmittelaufträgen, aber auch der Transfer von Erkenntnissen in die gelebte Praxis durch Festlegung in Normen und Regelwerken, sowie der gesamte Prozess einer technischen Erfindung über die Patentierung bis hin zur Marktreife.

Die Anwendung innovativer Konzepte und Methoden am Lehrstuhl für Geoinformatik spiegelt sich vor allem in zahlreichen Ingenieurprojekten und im Forschungsbereich der mobilen GIS wider. Die Ingenieurprojekte werden an verschiedenen Orten zur Optimierung, Ausgleichung und Analyse geodätischer Überwachungsnetze durchgeführt. Dabei wird das Geodätische Institut im Auftrag der Industrie oder der öffentlichen Hand immer dann tätig, wenn es sich um die Überwachung sicherheitstechnisch relevanter Anlagen handelt und/oder die Anforderungen an die zu erreichende Genauigkeit besonders hoch sind.

Innovative Projekte am Lehrstuhl für Physikalische und Satellitengeodäsie betreffen im Wesentlichen die Kooperation mit diversen Vermessungsbehörden, z. B. Landesvermessungsämtern, dem BKG und städtischen Dienststellen sowie Ministerien. Hierzu zählen Dienstleistungen wie die relative Kalibrierung von GNSS-Antennen und der Betrieb der GNSS-Referenzstation KARL auf dem Dach des GIK ebenso wie Auftragsarbeiten zur Bestimmung von Bodenbewegungen mittels SAR-Interferometrie. Produkte aus der Physikalischen

Geodäsie beziehen sich vor allem auf die Berechnung eines hochgenauen Quasigeoids für Baden-Württemberg zur Ermittlung von Gebrauchshöhen aus der GNSS-Positionierung und die Bereitstellung diverser topographisch-isostatischer Schwerefeldmodelle für internationale Projekte.

Innovationen zeigen sich am Lehrstuhl für Vermessungskunde und Geodätische Sensorik in vielfältiger Ausprägung. Eine besondere Expertise besteht bei der Entwicklung und Fertigung von Messmitteln wie z. B. Präzisions-Linearmessbahnen, wovon ebenfalls Auftragsentwicklungen gemäß Kundenwünschen profitieren, oder A-TOM, der als kostengünstiger Adapter zur Posenbestimmung entwickelt wurde, sowie nachführbare Reflektorhalterungen höchster Präzision. Aktuell wird mit nationalen und internationalen Partnern im Rahmen eines ZIM-Projekts¹ ein mobiler Messroboter entwickelt, der weltweit einzigartig ist und höchste Genauigkeitsansprüche erfüllt. Neuartige Lösungen werden bei der Optimierung und Beschleunigung von Messprozessen bei führenden Unternehmen erarbeitet oder bei der Entwicklung von Verfahren zur Qualitätssicherung, die bereits in der Praxis etabliert sind. Für Präzisionsvermessungen werden innovative und effiziente Methoden entwickelt, um speziellen Anforderungen, wie z. B. Reinraumbedingungen, zu genügen. Hierbei entstand ebenfalls das Softwaremodul FLIC, welches die Offsetkorrektur bei der Erfassung von Freiformflächen erleichtert. Durch die Kooperation mit dem KA-RaceIng-Team des KIT setzen sich GuG-Studierende mit innovativen Lösungswegen innerhalb eines sehr realitätsnahen interdisziplinären Projekts auseinander. Nicht zuletzt werden unterschiedliche Referenzwerte – z. B. durch Vergleichsstrecken – bereitgestellt, Messmittel mit besonderen Anforderungen überprüft und Expertise in internationale und nationale Normen sowie in verschiedene Gremien eingebracht.

¹ ZIM: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie(BMWi)

2 Lehrstuhl für Geoinformatik

Martin Breunig

2.1 Staufen im Breisgau

Im Jahr 2007 wurden im Innenstadtbereich von Staufen mehrere Bohrungen für Erdwärmesonden niedergebracht. Seither quillt im Untergrund eine Gipskeuperschicht und führt zu Hebungen, die inzwischen weit über einen halben Meter betragen. In etwas geringerem Umfang erfolgt auch eine Deformation des Gebietes in der Lage (siehe Abb. 81). Zusammen haben diese Deformationen über 100 Gebäude beschädigt mit einem Schadensvolumen im hohen zweistelligen Millionenbereich.

Die Deformationen werden über verschiedene Verfahren überwacht (InSar, Nivellement, Tachymetrie, GNSS). Das Geodätische Institut ist seit 2011 vor allem bei der Konzeption und Auswertung der Erfassung von Lageänderungen involviert. Hierbei wird ein hochpräzises Tachymeternetz im Innenstadtbereich von Staufen (vgl. Abb. 82) über GNSS mit Punkten verknüpft, die weit außerhalb des Deformationsbereichs liegen und als Stabilpunkte für die Deformationsanalyse dienen. Mit diesem Konzept können Deformationen in der Lage von wenigen Millimetern statistisch signifikant nachgewiesen werden. Bei der Auswertung kommen Softwarepakete zur Ausgleichung und Deformationsanalyse zum Einsatz, die vorwiegend am Geodätischen Institut entwickelt wurden.



Abb. 81: Badische Zeitung, 17.07.2009 (M. Donner).

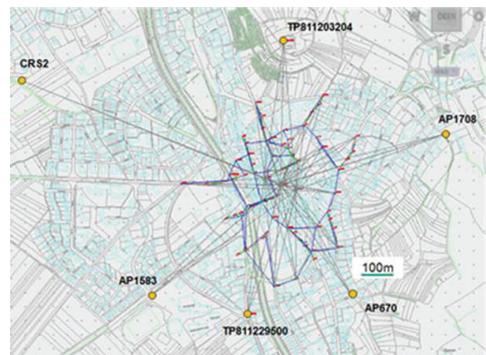


Abb. 82: Überwachungsnetz in Staufen (GIK).

2.2 Ausgleichsbecken Aubecken

Das am Hochrhein bei Abbruck-Dogern gelegene Aubecken ist Teil der Rheinkraftwerk Albruck-Dogern AG (RADAG), die seit dem 1. Januar 2004 von der Schluchseewerk AG geführt wird.

Das Aubecken (siehe Abb. 83) dient u. a. dem Ausgleich der durch die Pumpspeicherkraftwerke Waldshut und Säckingen verursachten Abflussschwankungen im Rhein. Es vergrößert mit einem Stauvolumen von ca. 2 Mio. m³ das bewirtschaftbare Speichervolumen der Schluchseewerke AG. Mit dem Bau des Beckens, das auf einer Seite von dem Werkkanal Albruck-Dogern und auf der anderen Seite vom Rhein umschlossen wird, wurde im Sommer 1975 begonnen.

Seit dieser Zeit ist das Geodätische Institut mit Überwachungsmessungen zum Nachweis der Stabilität des Ringdamms beauftragt. Das Deformationsnetz besteht zum jetzigen Zeitpunkt aus zehn landeinwärts gelegenen Stabil- und acht auf dem Ringdamm verteilten Objektpunkten (Abb. 84). Bei der Netzmessung mit hochgenauen Präzisionstachymetern wird in der Netzausgleichung ein mittlerer Punktfehler von wenigen 1/10 mm erreicht. Auf dieser Basis gelingt es im Zuge der geodätischen Deformationsanalyse das Bewegungsverhalten der Objektpunkte ebenfalls hochgenau zu erfassen und statistisch auf Signifikanz zu prüfen.

Da Messungen des Sickerwassers und des Grundwasserspiegels auf Probleme beim Dichtungssystem des Ringdamms hindeuteten und längerfristig auch zu einer Instabilität des 2.230 m langen Ringdamms hätten führen können, wurden 2017 umfassende Sanierungsmaßnahmen an der Dichtung des Damms durchgeführt. Dabei wurden zahlreiche Objektpunkte zerstört, sodass in 2018 die Nullmessung des neu vermarkten Netzes erfolgen wird.



Abb. 83: Foto: Schluchseewerk AG.

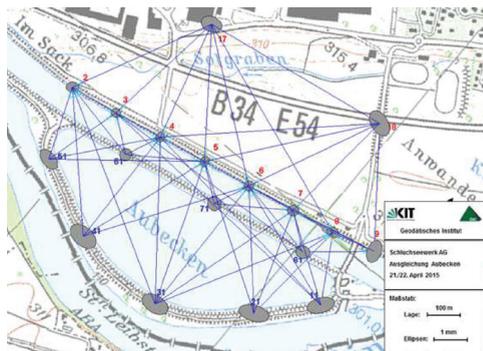


Abb. 84: Deformationsnetz Aubecken.

2.3 Hangrohrleitung Häusern

Die Oberstufe Häusern mit dem ältesten Pumpspeicherkraftwerk der Schluchseewerk AG bildet die erste Stufe einer dreiteiligen Kraftwerkskaskade vom Schluchsee bis zum Rhein (siehe Abb. 85). Gespeist wird das Kraftwerk vom Wasser des Schluchsees, das durch einen 6,2 km langen Druckstollen fließt. Neben dem zur Energiespeicherung bedeutsamen Pumpspeicherbetrieb werden enorme 600 m Fallhöhe vor allem auch zur Erzeugung erneuerbarer Energie genutzt.

Bei Häusern fließt das Wasser durch die beiden oberirdisch verlegten Stahlrohrleitungen direkt ins Krafthaus Häusern. Sie liegen direkt am Hang und haben eine Länge von 260 m. Das Geodätische Institut hat zur Überwachung der Stabilität der Rohre das Messkonzept entwickelt, ist an der Durchführung der Messungen vor Ort beteiligt und zeichnet für die wissenschaft-



Abb. 85: Hangrohrleitung Häusern.

lich fundierte Auswertung der Überwachungsmessungen verantwortlich. Insbesondere die topographischen Verhältnisse und das Gefälle der Leitung von mehr als 60% stellen an das Messkonzept und die praktische Durchführung der Überwachungsmessungen eine besondere Herausforderung dar, um die geforderte Genauigkeit der Punktbestimmung nach Lage und Höhe von wenigen 1/10 mm zu gewährleisten.

2.4 Netzwerke, mobile Geoinformationssysteme und Apps der Geoinformatik

Neben der grundlagenorientierten Forschung hat sich der Lehrstuhl Geoinformatik zum Ziel gesetzt, auch in Netzwerken der Praxis aktiv mitzuarbeiten und den Transfer aus der Wissenschaft in die Praxis zu unterstützen. Der Lehrstuhl ist Mitglied des *Runden Tisch GIS e. V.* an der TU München (www.rundertischgis.de) und im *Netzwerk Geoinformation der Metropolregion Rhein-Neckar e. V.* (www.geonet-mrn.de). Beide Institutionen bieten eine ideale Plattform für vernetzte Aktivitäten in und außerhalb der Region.

Praxisnahe Forschung wird derzeit am Lehrstuhl vor allem im schnell wachsenden Gebiet der mobilen Geoinformationssysteme betrieben. Dort geht es beispielsweise darum, georeferenzierte Daten vor Ort standardisiert auf einem mobilen Endgerät nach den Vorgaben des Open Geospatial Consortiums (OGC) zu erfassen und den Zugriff ebenfalls standardisiert durch entsprechende Dienste des OGC zu ermöglichen. Diese Vorgehensweise spielt vor allem bei Geodaten eine Rolle, die nicht oder nur schwer mit der Hilfe von Satelliten oder Flugzeugen aus der Luft erfasst werden können (z. B. von Bewuchs verdeckte Kanaldeckel). Der Fokus der angewandten Forschung liegt hier auf der Standardisierung des Workflows von der Datenerfassung hin zum Management und der Analyse der Daten. Eine solche standardisierte Bereitstellung von Geodaten wird auch in der europäischen INSPIRE-Richtlinie, dem nationalen Geodatenzugangsgesetz und dem Gesetz über den Zugang zu digitalen Geodaten für Baden-Württemberg gefordert. Für die Entwicklung neuer mobiler Geoinformationssysteme (siehe Abb. 86) bedeutet dies, dass die Geodaten direkt online oder bei evtl. schlechtem Netzempfang später offline auf einem nach den Vorgaben des OGC spezifizierten Format auf einen Geodatenbank-Server transferiert werden müssen.

Motiviert durch diesen Ansatz ist am Geodätischen Institut ein neuer Forschungszweig entstanden, der sich mit der Entwicklung mobiler GIS und Apps der Geoinformatik beschäftigt. In enger Kooperation mit dem Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL Karlsruhe, Abteilung *Produktion*) wurde in den vom Geodätischen Institut

und dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) praktizierten Vermessungsübungen des Studienganges *Geodäsie und Geoinformatik* dieser Ansatz weiterentwickelt und während der letzten Jahre entsprechende Tests im Gelände durchgeführt. Durch die Einwerbung von Exist-Gründerstipendien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und die Unterstützung des Innovationsmanagements am KIT (Dr. Blattner) ist aus dem Lehrstuhl Geoinformatik heraus ein Startup-Unternehmen (www.geotech-systems.de) entstanden. Dieses beschäftigt sich u. a. mit der Entwicklung von Apps der Geoinformatik, beispielsweise für standortbezogene Dienste (Location Based Services).

Künftig wird als weiterer für die Praxis relevanter Forschungszweig das Management und die Analyse sehr großer Datenmengen (*Big Geospatial Data*) sowohl für feld- als auch objektbasierte Daten (Raster- und Vektordaten) hinzukommen. Um die Verarbeitung dieser Daten mit Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) und ihre Anwendung in 3D Stadtmodellen zu erforschen, steht der Lehrstuhl in enger Verbindung mit dem Center for Research and Education in Smart Technologies (CREST) an der American University in Dubai.



Abb. 86: KIT-Innovation: Mobiles GIS mit standardisierter Geodatenerfassung.

3 Lehrstuhl für Physikalische und Satellitengeodäsie

Bernhard Heck

3.1 Quasigeoidberechnung für Baden-Württemberg

Kurt Seitz

Zur präzisen *Gebrauchshöhen*bestimmung in Echtzeit mittels GNSS-Levelling ist die Kenntnis über die Höhenbezugsfläche in Form der Höhenanomalie ζ die primäre Voraussetzung:

$$H^N = h - \zeta. \quad (1)$$

In der Bundesrepublik Deutschland werden Normalhöhen H^N im Höhensystem (DHHN2016) verwendet. Die zugehörige Höhenreferenzfläche ist das Quasigeoid (vgl. Abb. 87).

Animiert durch die Anfrage des LGL – ob am GIK ein Quasigeoid berechnet werden könnte – stellte sich die Arbeitsgruppe Physikalische Geodäsie dieser Herausforderung.

Ein gleichwertiger Motivationspunkt war die Erarbeitung eines realen, umfangreichen Beispiels zur Quasigeoidmodellierung und -berechnung für die Lehre. Konsequenter Weise ergaben sich bei der intensiven Beschäftigung mit diesem Thema auch starke Impulse für die Forschung z. B. im Bereich der Massenmodellierung, Modifikation der Kernfunktion und Supercomputing am SCC.

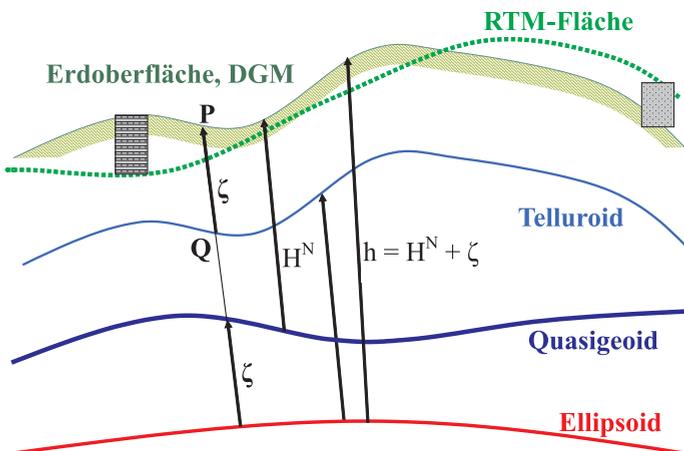


Abb. 87: Beziehungen zwischen DGM, RTM, h , H^N und ζ .

Modellbildung

Die regionale Quasigeoidbestimmung findet im Konzept der Remove-Compute-Restore Technik (RCRT) statt. Ihr liegt die Idee der spektralen Zerlegung (Forsberg und Tscherning, 1997; Denker, 2006; Wolf, 2008) zugrunde. Hierbei werden zunächst für die Observablen (Schwereanomalien $\Delta g = g_P - \gamma_Q$) im remove-Schritt die kurzwelligen und langwelligen spektralen Anteile unter gewissen Modellannahmen berechnet und aus den Observablen reduziert. Die langwelligen Signalanteile werden durch Synthese eines globalen Geopotentialmodells Δg_{GPM} berechnet. Hierzu eignen sich insbesondere die aktuellen Modelle aus den Schwerefeldmissionen *CHAMP*, *GRACE* und *GOCE* da sie einen commission-error von unter 2 cm aufweisen. Die aktuell gestartete Mission *GRACE-FO* wird diese Serie fortführen. Da in diesen Modellen bereits der langwellige Anteil der gravitativen Wirkung der Topographie enthalten ist, muss lediglich die sogenannte residuale Topographie berücksichtigt werden. Sie erzeugt kurzwellige Signalanteile und wird im Rahmen des Residual Terrain Modelling (RTM) konstruiert und ihr Einfluss auf die Observablen δg_{RTM} durch Vorwärtsrechnung ermittelt. Dieser Berechnungsschritt ist extrem rechenintensiv und verursacht hohe CPU-Kosten. Diese Problematik wurde durch die analytisch und numerisch innovative Tesseroidmethode unter Nutzung der Hochleistungsrechner am SCC gelöst. Siehe hierzu den Beitrag „Forschung am Geodätischen Institut“ auf Seite 143 in dieser Festschrift. Die verbleibenden residualen Anteile lauten nach dem remove-Schritt in jedem Beobachtungspunkt P :

$$\delta g_{RES} = \Delta g - \Delta g_{GPM} - \delta g_{RTM}. \quad (2)$$

Diese Vorgehensweise hat auch den Vorteil, dass die erhaltenen residualen Schwereanomalien (siehe Abb. 89) geeignet sind um aus den beliebig flächenhaft verteilten Punktwerten Gitterdaten für die nachfolgende Feldtransformation zu interpolieren. Dabei werden die gegitterten residualen Schwereanomalien durch Lösen des diskretisierten Stokesintegrals in den residualen Anteil an der Zielfunktion, der Höhenanomalie ζ , transformiert. Diese kann nun aus den entsprechenden spektralen Anteilen, analog zum remove-Schritt, im sogenannten restore-Schritt zusammengesetzt werden. Der langwellige Anteil ζ_{GPM} ergibt sich wiederum aus der Synthese des GPM und die kurzwelligen Effekte aus der Vorwärtsmodellierung der Potentialwirkung der RTM-Massen. Abermals auf der Basis der Tesseroidmethode.

Datengrundlage

Die zur Berechnung der Randwerte erforderlichen Schwereanomalien setzen gemessene Punktschwerewerte g_P voraus. Zur Erstellung der Datenbasis für die Punktschwerewerte über ganz Zentraleuropa wurden unterschiedliche Datenquellen um Bereitstellung von Punktschwerewerten kontaktiert. Nach langwieriger Datenakquise sind aktuell ca. 500.000 Punktschwerewerte mit ihren Lagekoordinaten und Höhen in die Datenbasis eingepflegt. Dabei wird auf die Anpassung an ein einheitliches Schweredatum geachtet. Die daraus berechneten Schwereanomalien sind in Abb. 88 dargestellt.

Zur Berechnung der kurzwelligen Feldanteile im remove- und restore-Schritt sind digitale Geländemodelle unterschiedlicher Auflösung erforderlich.

Quasigeoidlösung

Der zentrale Punkt bei der Quasigeoidlösung stellt die Feldtransformation dar. Hierbei gehen die auf ein Gitter interpolierten, residualen Schwereanomalien neben der Kernfunktion K in das Stokesintegral ein. Sie sollten keine langwelligen Strukturen mehr aufweisen, da diese durch das GPM bereits repräsentiert sind.

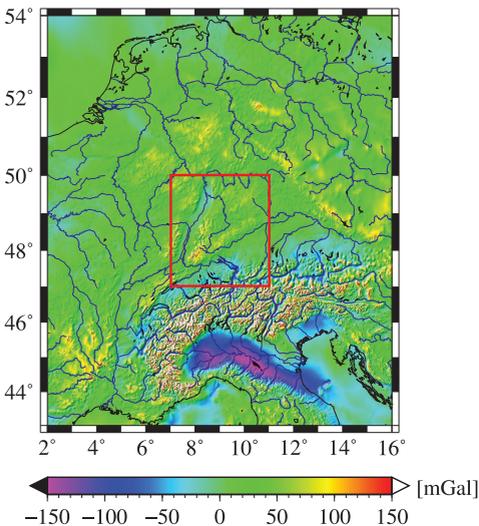


Abb. 88: Schwereanomalien Δg und Begrenzung des Berechnungsgebiets.

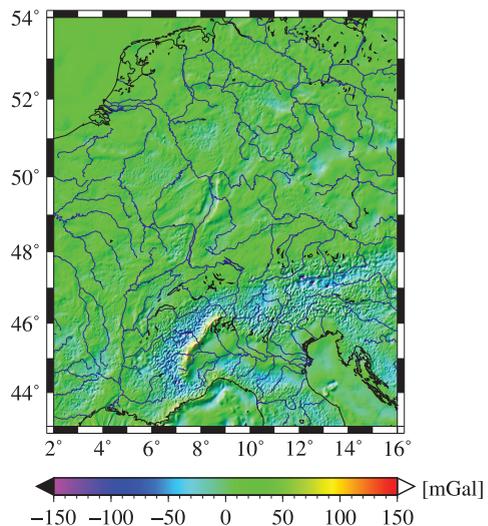


Abb. 89: Residuale Schwereanomalien δg_{RES} .

Um möglicherweise vorhandene langwellige Fehler in den Daten zu eliminieren, wird die ursprüngliche Kernfunktion (Stokesfunktion) derart modifiziert, dass sie durch ihre Filterwirkung lediglich als Hochpassfilter wirkt. Dazu wurden auch im Rahmen von studentischen Arbeiten Untersuchungen durchgeführt. Das ist nur ein Beispiel das zeigen soll, wie eng Forschung und Lehre am GIK gelebt wird.

Alle berechneten Varianten zeigen dasselbe qualitative Verhalten für die transformierten residualen Anteile. In Abbildung 90 ist beispielhaft das Ergebnis für den residualen Anteil zu sehen, welcher mit der modifizierten Kernfunktion nach Heck und Grüniger (1987) und einem Integrationsradius von 1° berechnet ist. Variationen im mittelwelligen Bereich dominieren im Berechnungsgebiet bei einem auffallend starken Gradienten im Bereich der Voralpen. Ansonsten zeigen sich Strukturen, welche deutlich mit der Topographie (Vogesen, Rheinebene, Schwarzwald, Schwäbische Alb) korreliert sind. Hier besteht noch weiteres Forschungspotential.

Polynomanpassung und Validierung

Um der gestellten Zielsetzung einer regionalen Quasigeoidberechnung voll gerecht zu werden, eine Transformationsfläche für ellipsoidische Höhen h_P nach Normalhöhen H_P^N zu realisieren

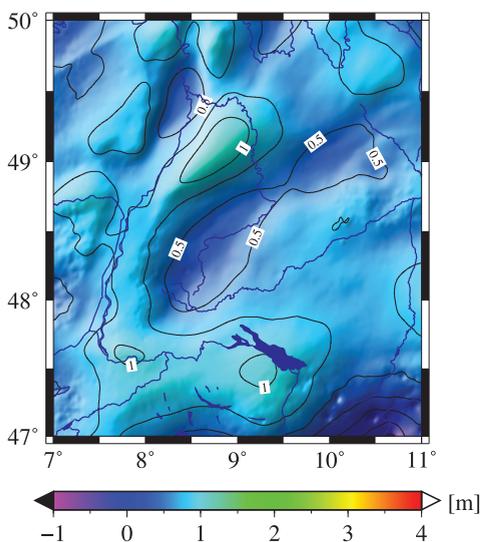


Abb. 90: Residuale Höhenanomalien $\delta\zeta_{res}(\Psi_{c,1.0})_{HG}$.

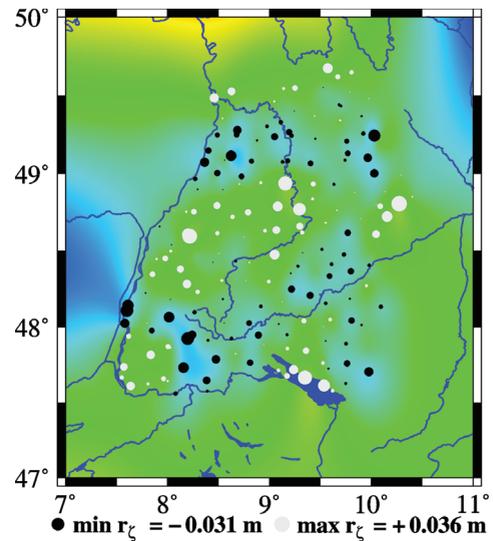


Abb. 91: Residuen r_ζ der Höhenanomalien in den Geodätischen Grundnetzpunkten.

(Gl. (1)), wird die Lösung aus Gleichung (2) über identische Punkte für Baden-Württemberg angepasst. Dies erfolgt über einen Polynomansatz niedrigen Grades. Im vorliegenden Fall konnten 184 sogenannte Grundnetzpunkte als identische Punkte verwendet werden. Von ihnen liegen präzise (geometrische) ellipsoidische Höhen sowie (physikalische) Gebrauchshöhen vor. Nach Berechnung der Polynomparameter und Auffelderung des entwickelten regionalen Quasigeoidmodells auf die Passpunkte ergab sich eine mittlere Restklaffung in den identischen Punkten von 14 mm. Die Verteilung der Passpunkte und die dort auftretenden Residuen sind in Abb. 91 zu sehen.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Quasigeoid Projekt das in der Arbeitsgruppe Physikalische Geodäsie bearbeitet wird, hat den guten Austausch zwischen dem GIK und dem LGL weiter intensiviert und gestärkt. Sowohl in Forschung als auch Lehre hat das Projekt einige innovative Inspirationen hervorgerufen.

Das berechnete regionale Quasigeoidmodell für Baden-Württemberg weist eine ausgezeichnete Qualität und Genauigkeit auf. Die entwickelten Modelle und erprobten Auswerteroutinen werden auf weiter verbesserte Datensätze angewendet.

Allen, die zum Erfolg dieses innovativen Forschungsprojektes beigetragen haben, sei gedankt.

3.2 Topographisch-isostatische Schwerefeldmodelle

Thomas Grombein

Mit globalen, hochauflösenden digitalen Geländemodellen (DGMs) stehen heutzutage detaillierte Informationen über die Topographie der Erde zur Verfügung. Diese erlauben es, den gravitativen Einfluss der Topographie auf das Erdschwerefeld hochgenau zu bestimmen. Die zentrale Methode hierfür ist die Vorwärtsmodellierung, die auf dem Newtonschen Gravitationsgesetz beruht und es ermöglicht, aus topographischen Höhen, zusammen mit geeigneten Dichteannahmen, die Wirkungen auf das Schwerepotential und seine Funktionale zu berechnen. Diese topographische Vorwärtsmodellierung spielt eine zunehmend größere Rolle in verschiedenen Anwendungen der geodätischen Schwerefeldmodellierung sowie in geophysikalischen Studien zum Aufbau und zur Struktur der Erdkruste.

Durch immer genauere und sensitivere Beobachtungsverfahren sind auch die Genauigkeitsanforderungen an die Vorwärtsmodellierung gestiegen. Bisher verwendete Vereinfachungen und Approximationen müssen daher kritisch hinterfragt werden. Am Geodätischen Institut wurde

Tab. 5: Überblick über die generierten Schwerefeldmodelle der Versionen 2012 und 2015.

Version	Modellname	Gravitationspotential
Version 2012 (Grombein u. a., 2014)	RWI_TOPO_2012	Topographisch
	RWI_ISOS_2012	Isostatisch
	RWI_TOIS_2012	Topographisch-Isostatisch
Version 2015 (Grombein u. a., 2016)	RWI_TOPO_2015	Topographisch
	RWI_TOPO_2015_Rock	Topographisch (Gestein)
	RWI_TOPO_2015_Water	Topographisch (Wasser)
	RWI_TOPO_2015_Ice	Topographisch (Eis)
	REQ_TOPO_2015	Topographisch (kondensiert)

in den vergangenen Jahren wesentlich zur Weiterentwicklung der Vorwärtsmodellierung im Ortsbereich beigetragen, indem neue Methoden und Verfeinerungen bereitgestellt wurden. Für eine realistischere Modellierung der topographischen Erdmassen und deren tiefer liegenden (isostatischen) Kompensationsmassen wurde die Theorie des Rock-Water-Ice (RWI)-Ansatzes entwickelt, siehe Grombein (2017). Dieser Ansatz ist durch eine Zerlegung der Erdtopographie in drei Schichten gekennzeichnet, wodurch eine strenge, separate Modellierung der Gesteins-, Wasser- und Eismassen mit variablen Dichtewerten ermöglicht wird. Des Weiteren wird ein modifiziertes isostatisches Airy-Heiskanen-Konzept angewandt, welches durch die Verwendung von zusätzlichen geophysikalischen Informationen verbessert werden konnte.

Basierend auf den topographischen Informationen aktueller DGMs wurde eine Massenmodellierung mit Tesseroid-Körpern verwendet, welche durch geozentrisch-sphärische Koordinatenlinien begrenzt sind und daher die Erdkrümmung direkt berücksichtigen. Die Berechnung erfolgte dabei durch die von Heck und Seitz (2007) entwickelte und von Grombein u. a. (2013) optimierte Karlsruher Tesseroidmethode (siehe Beitrag „Forschung am Geodätischen Institut“ auf Seite 143 in dieser Festschrift). Im Sinne einer verbesserten räumlichen Anordnung der topographischen Massen wurden Tesseroiden zudem auf eine ellipsoidische Referenzfläche aufgesetzt.

Um den RWI-Ansatz in anderen Forschungsanwendungen möglichst einfach einsetzen zu können, wurden eine Reihe von topographisch-isostatischen Schwerefeldmodellen generiert. Diese RWI-Modelle liefern eine hochauflösende Darstellung des topographisch-isostatischen Gravitationspotentials in Form von Kugelfunktionsentwicklungen bis Grad und Ordnung

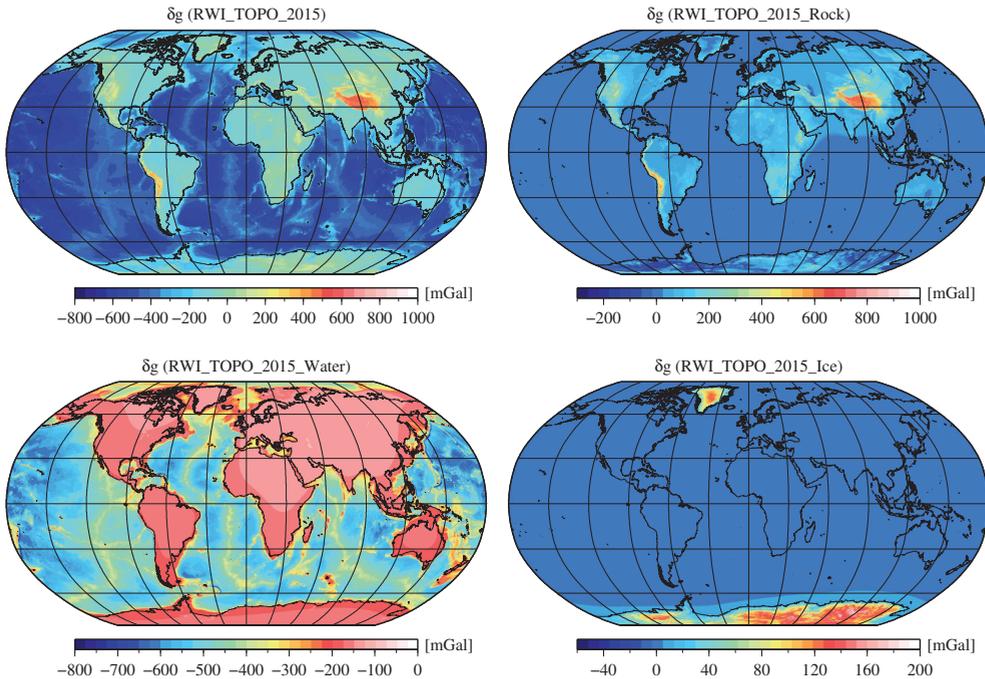


Abb. 92: Topographisches Schwere-signal auf der Oberfläche des GRS80 Ellipsoids ausgewertet mit den Modellen RWI_TOPO_2015, RWI_TOPO_2015_Rock, RWI_TOPO_2015_Water und RWI_TOPO_2015_Ice.

1800 (Version 2012, Grombein u. a., 2014) bzw. 2190 (Version 2015, Grombein u. a., 2016), siehe Tab. 5. Die Kugelfunktionskoeffizienten dieser Modelle wurden über eine sphärisch-harmonische Analyse aus globalen Gittern von Potentialwerten abgeleitet. Für die Generierung der Gitterwerte wurden dabei stark parallelisierte Berechnungen auf dem Hochleistungsrechner des Steinbuch Centre for Computing (SCC) des KIT durchgeführt. Mittels sphärisch-harmonischer Synthese können die RWI-Modelle zur effizienten Berechnung verschiedener Funktionale des topographisch-isostatischen Potentials in unterschiedlichen Auswertehöhen verwendet werden (siehe Abb. 92). Die Koeffizienten der RWI-Modelle sind über die Datenbank des International Centre for Global Earth Models (ICGEM, <http://icgem.gfz-potsdam.de>) frei verfügbar und sind bereits in vielfältigen Anwendungen internationaler Forschungsgruppen zum Einsatz gekommen, u. a. als Eingangsdaten für das kombinierte Schwerefeldmodell GOCO05c (Fecher u. a., 2017), zur Reduktion in geophysikalischen Anwendungen (Bouman u. a., 2016) oder als Referenzmodell zur unabhängigen Validierung (Novák und Tenzer, 2013).

3.3 Betrieb der GNSS-Referenzstation KARL

Kurt Seitz, Michael Mayer, Andreas Knöpfler und Bernhard Heck

Seit 20. März 1997 betreibt das Geodätische Institut des KIT (GIK) in Kooperation mit dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, ehemals IfAG, Institut für Angewandte Geodäsie) eine GNSS-Permanentstation mit der Bezeichnung KARL. Die auf dem Messdach des GIK installierte Empfangsanlage besteht aus einer hochpräzisen, absolut kalibrierten Chokering-Antenne mit Radom (*LEIAR25.R4 LEIT*, vgl. Abb. 93), einem geodätischen GNSS-Empfänger (*JPS LEGACY*), einem Kontrollrechner, einer meteorologischen Station, der notwendigen Netzwerkinfrastruktur und einer Notstromversorgung. Der Empfänger zeichnet permanent 24 Stunden am Tag alle von GNSS-Satelliten ankommenden Signale auf und leitet diese an das Daten- und Auswertezentrum des BKG in Frankfurt/Main weiter. Während zunächst nur die Signale des amerikanischen Satellitennavigationssystems GPS registriert wurden, ist die Anlage heute darüber hinaus in der Lage die Signale des russischen GLONASS-, des europäischen Galileo- und des chinesischen Beidou-Systems, somit aller existierenden globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS), zu empfangen.

Die Station mit der Bezeichnung KARL00DEU ist seit 30.08.1998 in das europäische EPN (*EUREF* Permanent GNSS Network)-Netz eingebunden und dient unter anderem der Festlegung des europäischen geodätischen Referenzsystems, in welches die Systeme der nationalen Landesvermessungen eingehängt sind. Bis Oktober 2010 war die Station KARL darüber hinaus in das Satellitenpositionierungssystem der deutschen Landesvermessungen *SAPOS*[®] integriert, wo sie als Referenz für lokale Vermessungen z. B. im Kataster und in der Ingenieurvermessung benutzt wurde. Auch in dem für die regionale Überwachung von Bodenbewegungen im Bereich des Oberrheingrabens verwendeten, grenzüberschreitenden GNSS-Netz GURN (GNSS Upper Rhine Graben Network) ist die Station KARL ein wesentlicher Bestandteil. Die Station KARL ist darüber hinaus in die nationalen und internationalen Netze *ascos*, *DREFonline* und *GRAF* integriert.

Die an der Station KARL aufgezeichneten GNSS-Daten werden online in das *GNSS Data Center (GDC)* übertragen und dort in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen gespeichert. Standardmäßig werden die Daten mit einer Datenrate von 30 s archiviert. Für einen begrenzten zurückliegenden Zeitraum werden auch hochaufgelöste Daten (1 Hz) von KARL gespeichert, welche von <ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/highrate/> heruntergeladen werden können.

Die aus den Messungen jeweils eines gesamten Tages berechneten Koordinaten des Antennenstandpunktes bilden nunmehr Jahrzehnte lange *Zeitreihen*, in denen nicht nur die tektonischen Bewegungen der eurasischen Platte, sondern weitere, insbesondere jahresperi-

odische Änderungen sichtbar sind, die wahrscheinlich temperaturbedingte Bewegungen des Gebäudes widerspiegeln. Da die von den Satelliten abgestrahlten elektromagnetischen Signale die Erdatmosphäre durchlaufen und deren Laufzeit u. a. durch den jahreszeitlich variierenden Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre beeinflusst wird, ergibt sich ferner die Möglichkeit klimatologische Faktoren wie zeitliche Veränderungen der *Atmosphäre* zu erfassen.

Seit über 20 Jahren nimmt die GNSS-Permanentstation KARL einen festen Platz in Forschung und Lehre am GIK ein. Bis heute ist das GIK das einzige deutsche Hochschulinstitut mit direktem Zugang zu einer solchen GNSS-Referenzstation.



Abb. 93: Antenne der Referenzstation KARL. Foto: Kurt Seitz, GIK.

3.4 Kalibrierung von GNSS-Empfangsantennen am GIK

Kurt Seitz, Michael Mayer und Andreas Knöpfler

Der rasche Auf- und Ausbau von hochpräzisen lokalen, regionalen und globalen GNSS-Netzen in den zurückliegenden zwanzig Jahren sowie die Herstellung von preiswerter GNSS-Ausrüstung macht eine Bearbeitung von heterogenen Antennenfeldern (Empfangsantennen) im Alltag des modernen Geodäten i. d. R. unumgänglich.

Diese Tatsache rührt einerseits von der Nutzung unterschiedlicher Antennentypen beim Aufbau der einzelnen übergeordneten Netze (z. B. *SAPPOS*[®], IGS), andererseits von den auf Nutzerseite eingesetzten GNSS-Antennen her. Bleiben die Unterschiede der verschiedenen Antennenbaureihen unberücksichtigt, so muss im Verlauf der GNSS-Signalverarbeitung mit einer nicht mehr vernachlässigbaren Verschlechterung der Zwischen- und Endergebnisse (z. B. Phasenmehrdeutigkeiten, Koordinaten, Genauigkeitsmaße) gerechnet werden. Seit einigen Jahren ist GNSS-Nutzern bekannt, dass auch innerhalb einer Baureihe fertigungsbedingte Unterschiede (z. B. Konstruktionstoleranzen) bestehen können, denen auf Grund gewachsener Ansprüche bspw. durch die Verwendung von verbesserten und erweiterten Modellen Rechnung getragen werden muss.

Somit ist mit diesem stationsspezifischen Störeinfluss eine signifikante Limitierung der Genauigkeit gegeben. Neben Fehleranteilen, bedingt durch neutrale Atmosphärenbereiche, Ionosphäre, Satellitenbahndaten oder Mehrwegeeffekte, ist ein individuelles Antennenmodell für die hochgenaue Punktpositionierung bspw. für geodynamische Anwendungen vor allem bei statischen Beobachtungskonzepten, aber auch im Echtzeitanwendungsfall zu berücksichtigen. Die Auswirkungen einer nicht umfassenden oder nicht korrekten Handhabung dieses Fehlereinflusses auf Koordinaten können, wie am GIK durchgeführte Forschungsarbeiten belegten (Knöpfler u. a., 2007), in ungünstigen Fällen mehrere Zentimeter betragen. In seiner Dissertation hat sich Freiburger Junior (2007) während seines Aufenthaltes am GIK (UniBral/ProBral) diese Kompetenzen erarbeitet und am LAGE UFPR in Curitiba/Brasilien etabliert (Freiburger Junior u. a., 2007, 2005a,b; Krueger u. a., 2009). Abbildung 97 zeigt die auf dem Dach des Laborhauses am LAGE UFPR installierte Kalibriervorrichtung DRB. Mit der Dissertation von Huinca (2014) wurde diese enge thematische Kooperation fortgeführt (Huinca u. a., 2012, 2016).

Das Modell für GNSS-Empfangsantennen setzt sich aus dem konstanten Phasenzentrumsoffset (PZO) und den von der Richtung des einfallenden Signals abhängigen Phasenzentrumsvariationen (PZV) zusammen. In diesem Kontext sind auch die beiden Begriffe mechanisches bzw. elektrisches Phasenzentrum von besonderer Bedeutung: Das mechanische Phasenzentrum ent-

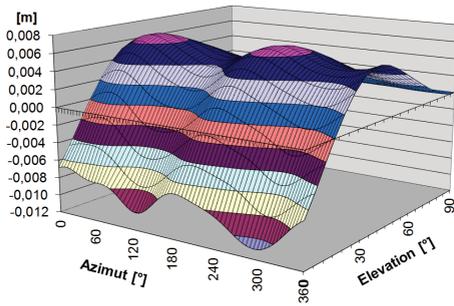


Abb. 94: Relative PZV-Werte für GPS L1 für eine Leica AT 503 Antenne.

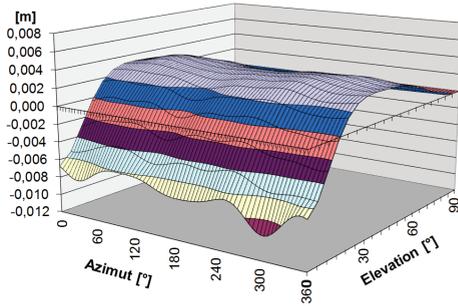


Abb. 95: Relative PZV-Werte für GPS L2 für eine Leica AT 503 Antenne.

spricht einer theoretischen (bspw. fertigungsbedingten) Sollposition des Phasenzentrums und ist in der Regel Teil der Symmetrieachse der Antenne. Die Position wird in einem spezifischen antennenfesten Koordinatensystem beschrieben. Der Ursprung wird Antennenreferenzpunkt (ARP) genannt und liegt im Zentrum der Antennenunterseite. Die Koordinatenachsen fallen mit den Achsen eines lokalen topozentrischen Koordinatensystems zusammen. Zu beachten ist jedoch, dass das mechanische Phasenzentrum bspw. aus mehreren Einzelbestandteilen zusammengesetzt ist. Wird unter anderem der Wechselwirkung der empfangenen elektromagnetischen Signale mit den Antennenbestandteilen Rechnung getragen, so ergibt sich eine Abhängigkeit der Lage des sog. elektrischen Phasenzentrums von der Richtung (Elevationswinkel, Azimut), aus der die GNSS-Signale einfallen. Die elektrischen Phasenzentren unterschiedlicher GNSS-Trägerfrequenzen fallen in der Regel nicht zusammen (Frequenzabhängigkeit), so dass sich in Abhängigkeit von der im Rahmen von GNSS-Auswertungen angewandten Linearkombination darüber hinaus unterschiedliche Phasenzentren ergeben.

Der PZO stellt eine mittlere Position des elektrischen Phasenzentrums dar, welche im antennenspezifischen Koordinatensystem frequenzabhängig metrisch angegeben wird, wohingegen die PZV der Richtungsabhängigkeit Rechnung tragen und somit Verbesserungen der Phasemessungen in Bezug auf das mittlere elektrische Phasenzentrum darstellen. PZV sind ebenfalls frequenzabhängig. Die Abbildungen 94 und 95 zeigen das Kalibrierresultat für eine Leica AT 503 Antenne, durch das dieser Sachverhalt deutlich wird.

Im Rahmen von Antennenkalibrierungsverfahren werden individuelle Werte für PZO und PZV der Trägerfrequenzen bestimmt. Eine Klassifizierung der prinzipiell anwendbaren Verfahren zur Empfangsantennenkalibrierung ist über die Örtlichkeit (Labor, Feld) bzw. die Signalart (künstlich, real) sowie über den vorhandenen bzw. nicht existierenden Bezug zu einer Referenzantenne (relativ, absolut) möglich.



Abb. 96: Bestimmung des Höhenunterschieds zwischen Pfeilervermarkung und ARP der Permanentstation KARL.



Abb. 97: Kalibriervorrichtung DRB installiert in Curitiba/Brasilien. Die baugleiche Vorrichtung wird auch am GIK eingesetzt.

Relative Feldkalibrierungen, die am GIK auf einem eigenen Test- und Kalibrierfeld für GNSS-Empfangsantennen durchgeführt werden, gehören neben absoluten Laborkalibrierungen zu den traditionellen Kalibrierungsverfahren; sie werden seit Anfang der 1990er Jahre erfolgreich eingesetzt.

Am GIK wird ein relatives Feld-Kalibrierverfahren zur Anwendung gebracht, welches sich durch eine hohe Robustheit gegenüber lokalen Einflussfaktoren auszeichnet. Die zur Verfügung gestellten Resultate geben zudem einen guten Einblick in die Bandbreite der Streuung der Kalibrierergebnisse, so dass ebenso Rückschlüsse auf das variable Empfangsverhalten der GNSS-Antennen sowie auf die Gültigkeit von Korrekturwerten in unterschiedlichen Umgebungen getroffen werden können.

Die Referenz stellt dabei die Referenzstation KARL (Abb. 93) dar. Für diese ca. 15 m von den Kalibrierpfeilern entfernte GNSS-Permanentstation liegen individuelle absolute, von der Fa. Geo++ bestimmte Werte vor, die das Empfangsverhalten der Antenne hochgenau beschreiben. Somit können durch das angewandte relative Verfahren für jeden Prüfling individuelle absolute Kalibrierwerte bestimmt werden. Hierzu ist eine präzise Ermittlung der Höhendifferenz zwischen zu kalibrierender und Referenzantenne notwendig (Abb. 96).

Es wird pro Prüfling und Standort 24 Stunden Beobachtungsmaterial mit einer Rate von 60 s gesammelt und ausgewertet. Dabei wird der Prüfling pro Minute automatisch in vier unter-

schiedliche Richtungen (N-S-O-W) gedreht, wodurch für die gesamte Antennenhemisphäre Korrekturwerte bestimmt werden können.

In gewisser Regelmäßigkeit lässt z. B. der Fachbereich Geoinformation und Vermessung der Stadt Mannheim seine GNSS-Antennen am GIK kontrollieren. Nicht nur das GIK hält eine regelmäßige Überwachung (alle 2 Jahre) der Antennencharakteristik für sinnvoll, so dass zeitliche Veränderungen feststellbar sind. Ebenso empfehlen wir eine Antennenüberprüfung bei einem Verdacht auf Beschädigung. Siehe hierzu auch Fritzensmeier u. a. (2017) und Zeimetz u. a. (2011).

3.5 Einsatz der SAR-Interferometrie zur Bestimmung von Beginn und Ausgangspunkt eines durch Erdwärmesonden ausgelösten Hebungssignales in Böblingen

Malte Westerhaus

Seit Beginn des Jahres 2011 werden im Stadtgebiet Böblingen Gebäudeschäden im Zusammenhang mit einer Anhebung des Untergrundes gemeldet. Es gilt als sehr wahrscheinlich, dass die Hebungen auf einen Quellvorgang im unter der Stadt anstehenden Gipskeuper zurückzuführen sind, der durch Erdwärme-Sonden-Bohrungen im Oktober 2006, Januar 2007 und September/November 2008 ausgelöst wurde. Ab Mitte 2011 sind die Hebungsbereiche und Hebungsraten auf der Basis verschiedener geodätischer Messverfahren eindeutig dokumentiert, ebenso konnte ein Zusammenhang zwischen dem Abteufen der Bohrlöcher während der zweiten Bohrphase Ende 2008 und dem Einsetzen des Hebungsvorgangs im nördlichen Schadensgebiet bestätigt werden.

Für die Jahre davor stehen erheblich weniger Beobachtungsdaten zur Verfügung. Insbesondere waren Beginn und Ausgangspunkt der Hebungssignale im südlichen Schadensbereich nicht eindeutig geklärt. Aus diesem Grund förderte das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (LUBW) im Rahmen des Programms BWPLUS das Forschungsprojekt "Einsatz der Multi-track SAR-Interferometrie zur Bestimmung von Beginn und Ausgangspunkt des Hebungssignales in Böblingen" am GIK. Ziel des Projektes waren Aussagen zum Zusammenhang zwischen den Bohrungen im Herbst 2006 und dem Einsetzen des Hebungssignales. Die Arbeiten konzentrierten sich i. W. auf Untersuchungen zur Genauigkeit, mit der sich der räumliche und zeitliche Ausgangspunkt des Hebungssignales im Jahre 2006 retrospektiv ermitteln lässt.

Zu diesem Zweck wurden 62 Szenen des C-Band Radarsatelliten Envisat aus den Jahren 2003 bis 2010, aufgenommen von zwei benachbarten, einander überschneidenden Beobachtungstreifen, nach der Methode der Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PSI) prozessiert. Die erhaltene Bewegungskarte weist erhöhte Verschiebungsraten in den zwei bekannten Schadensgebieten im Ostteil der Stadt Böblingen aus, die als Hebungssignal interpretiert werden (Abb. 98). Im südlicheren der beiden Hebungsgebiete können drei Bewegungsphasen dokumentiert werden:

1. ein schwaches Hintergrundsignal von ca. 0,5 mm/Jahr
2. Bohrphase I (Oktober 2006/Januar 2007): erhöhte Verschiebungsraten von 0,9 mm/Jahr bis 7,3 mm/Jahr
3. Bohrphase II (September/Oktober 2008): Anstieg der Hebungsraten auf 17,5 mm/Jahr.

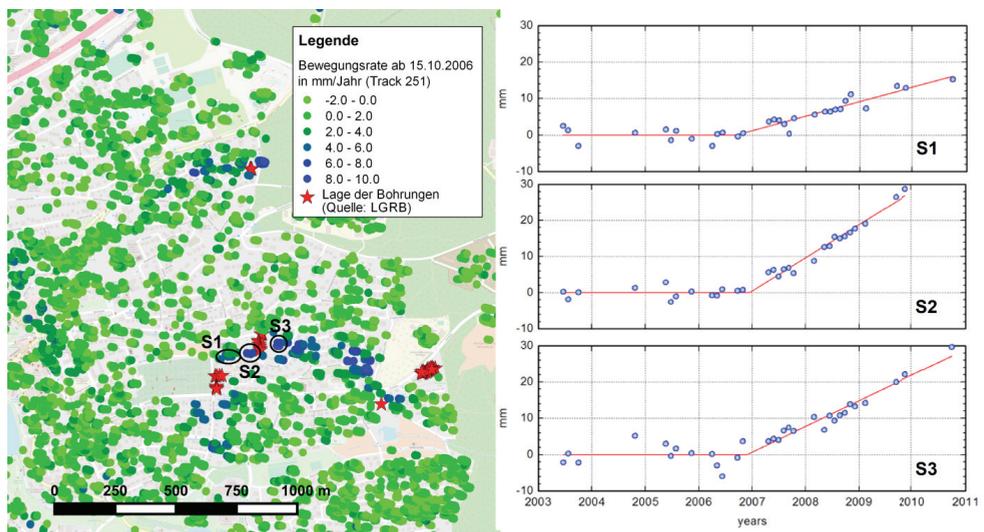


Abb. 98: Lage der Persistent-Scatterer-Punkte (PS-Punkte) im östlichen Stadtgebiet von Böblingen (links). Zwei Hebungs- bzw. Schadensgebiete treten deutlich hervor (blaue Farben). Der rechte Teil der Abbildung zeigt drei Beispielzeitreihen aus dem südlichen Schadensgebiet. Die rote Linie kennzeichnet ein einfaches Bewegungsmodell, das bestmöglich an die beobachteten Verschiebungen in Line-of-sight (LoS) angepasst wurde. Die Präzision, mit der der Beginn der Hebung aus einer einzelnen Zeitreihe bestimmt werden kann, liegt zwischen 40 und 183 Tagen. Die Präzision eines gewichteten Mittels aus benachbarten PS-Punkten verbessert sich auf ca. 20 Tage (Projekt Böblingen, Maryse Wampach).

Die akkumulierten Hebungsbeträge zwischen Oktober 2006 und Oktober 2010 erreichen Werte von über 40 mm. Die Ergebnisse einer unabhängigen Auswertung des zweiten zur Verfügung stehenden Beobachtungstreifen bestätigen diese Befunde.

Die spezifischen Fragestellungen der Studie wurden mittels einer Anpassung physikalisch sinnvoller Bewegungsmodelle an die Beobachtungsreihen einzelner PS-Punkte adressiert. Wesentliche statistische Kenngrößen der abgeleiteten Modellparameter als Funktion von Signalrauschen, Akquisitionsintervall, Hebungsrate sowie verschiedenen Satellitenkonstellationen wurden auf Basis simulierter Daten quantifiziert und es wurde ein Verfahren zur Ableitung aussagekräftiger Streuungsmaße aus einzelnen Datenreihen entwickelt. Für die realen Messreihen der Fallstudie Böblingen liegt die Präzision, mit der der Beginn des Hebungseignisses angegeben werden kann, zwischen 40 und 183 Tagen. Sie verbessert sich auf 19,7 Tage für das gewichtete Mittel über PS-Datenreihen in einem Abstand von bis zu 430 m von den Bohrungen. Der wahrscheinlichste Zeitpunkt für den Beginn der Hebungen fällt auf den 05.11.2006, 24 Tage nach Beginn der Bohrarbeiten. Ein kausaler Zusammenhang zwischen den Bohrungen im Oktober 2006 und dem Einsetzen des Hebungssignales im südlichen Schadensgebiet der Stadt Böblingen kann damit als sehr wahrscheinlich angenommen werden. Diese Ergebnisse sind für das LUBW sowie das Landratsamt Böblingen bei der Abwicklung des Schadensereignisses von Bedeutung. Der Projektbericht ist auf dem Fachdokumentenserver des LUBW (<http://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de>) unter der Rubrik Umweltforschung/Berichte zu finden.

Die Fallstudie Böblingen verdeutlicht das große Potential der SAR-Interferometrie für die Vermessung von Bodenbewegungen. Es gibt kein anderes Verfahren, mit dem sich der Einsetzzeitpunkt eines Hebungs- oder Senkungseignisses retrospektiv mit vergleichbarer Genauigkeit quantifizieren ließe. Auch Jahre nach einem auslösenden Ereignis können zeitliche und räumliche Zusammenhänge mit dem Auftreten größerer Schäden an der Bausubstanz mit ausreichender Präzision bestimmt werden. Die Studie zeigt auch die zukünftige Bedeutung der Satellitenmission Sentinel für ein flächenhaftes Monitoring in Regionen mit kritischen Untertageaktivitäten. Ein solches Monitoringsystem, in das eine Quasi-Echtzeit-Auswertung von Sentinel 1A/1B eingebunden wäre, würde ein Hebungseignis wie in Böblingen innerhalb weniger Monate zuverlässig detektieren können und, in Verbindung mit der entsprechenden Bereitschaft öffentlicher Einrichtungen, zu einer Vermeidung von erheblichen Schäden an Gebäuden und Infrastruktur beitragen.

3.6 Einsatz der SAR-Interferometrie zur Quantifizierung von Bodensenkungen über Erdgaslagerstätten in Norddeutschland

Malte Westerhaus

Von vielen Fördergebieten in sedimentären Strukturen ist bekannt, dass die Produktion von Kohlenwasserstoffen zu Deformationen, Senkungserscheinungen und induzierten Erdbeben führen kann. Das Geodätische Institut war von 2014 - 2017 in Kooperation mit dem Institut für Angewandte Geowissenschaften des KIT, des Instituts für Geowissenschaften und Geographie der Universität Halle, des Ingenieurbüros Piewak & Partner, Bayreuth, sowie verschiedenen erdöl- und erdgasexplorierenden Firmen Teil des interdisziplinären Projektes "Reservoir-Management & Seismicity" (RMS), in dessen Rahmen der Zusammenhang zwischen geotechnischen Eingriffen in den Untergrund und potentiellen Schadensereignissen weiter untersucht wurde. Ansatzpunkt des von der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle (DGMK) geförderten Projektes war es, über die experimentelle Bestimmung petrophysikalischer Eigenschaften des Reservoirgesteins eine Verbindung zwischen druckabhängigen Spannungsänderungen im Untergrund und Oberflächenbewegungen sowie Seismizität herzustellen. Mit diesen interdisziplinären Untersuchungen sollte das Verständnis der Prozesse, die zur Freisetzung seismischer Energie während der Produktion führen, erhöht und eine wissenschaftlich begründete Basis für den kontrollierten Betrieb einer Lagerstätte erarbeitet werden. Aufgabe des GIK war die quantitative Bestimmung des Verschiebungsfeldes an der Erdoberfläche. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 231 C-Band Radarszenen der Satelliten ERS-1/2 und Envisat mit den Methoden der Persistent Scatterer Analyse (PSI) und der Small Baseline Subsets (SBAS) prozessiert und analysiert. Die Ergebnisse zeigen eine geringe, aber signifikante Absenkung von 1 mm/Jahr - 2 mm/Jahr über verschiedenen Gasfeldern zwischen Hannover und Bremen mit maximalen Raten von bis zu 3 mm/Jahr im nördlichen Bereich des Gasfeldes Söhlingen (Abb. 99). Die Standardabweichungen liegen im Mittel bei 0,26 mm/Jahr. Eine Auswertung von Wiederholungsnivellements der Landesvermessung auf einer durch das Untersuchungsgebiet führenden Linie 1. Ordnung bestätigt die Befunde der SAR-Interferometrie. Ein Einfluss von Schwankungen im Grundwasserstand konnte durch Vergleich mit Zeitreihen des Wasserstandes in benachbarten Brunnen ausgeschlossen werden. Die interferometrisch bestimmte Absenkungsgeschwindigkeit korreliert mit der Gasproduktionsrate sowie dem Druckverlauf im Reservoir Söhlingen. Es gibt Hinweise darauf, dass transiente Variationen im Druckverlauf zu zeitlich verzögerten, nicht-linearen Verschiebungen an der Erdoberfläche führen. Die Datenlage reichte jedoch nicht aus, um petrophysikalische oder poro-elastische Eigenschaften des Reservoirs quantitativ zu bestimm-

men. Nicht-Symmetrien in den Profilen durch den Absenkungstrichter (Abb. 99) könnten auf den Einfluss einer geologischen Störung in der Lagerstätte Söhlingen hindeuten. Mit Hilfe der SAR-Interferometrie konnte somit nachgewiesen werden, dass auch in den Gasfeldern nördlich von Hannover geodätisch beobachtbare Kompaktion der ausgebeuteten Schichten im Untergrund auftritt. Im Gegensatz zu anderen Fördergebieten war dies nicht von vornherein zu erwarten, da die gasführenden Schichten im Feld Nordhannover durch Salzstöcke überlagert werden, deren Plastizität einen dämpfenden Einfluss ausüben kann. Die Fallstudie Söhlingen zeigt verschiedene Anwendungsmöglichkeiten der SAR-Interferometrie für die Produktionsfirmen auf. Zum einen liefern die beobachteten Absenkungsgeschwindigkeiten wichtige Randbedingungen für die Abschätzung des Gefährdungspotentials von Infrastruktur und Gebäuden an der Oberfläche. Andererseits erlauben räumliche Unterschiede im Verhältnis zwischen Oberflächenverschiebung und Druckänderung prinzipiell Rückschlüsse auf die poro-elastischen Eigenschaften verschiedener Schichten und Kompartimente des Reservoirs, die sich für einen effektiven Produktionsbetrieb nutzen lassen. Das GIK ist derzeit an einem Nachfolgeprojekt beteiligt, in dem unter anderem nicht-lineare, betriebsbedingte Senkungen und Hebungen über Erdgasspeichern analysiert werden.

3.7 Ein studentisches Projekt zur Voruntersuchung potentieller Aufstellungsorte für SAR-Corner-Reflektoren an SAPOS[®]-Stationen der Landesvermessung

Malte Westerhaus

Der Satellitenpositionierungsdienst SAPOS[®], ein Gemeinschaftsprojekt der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, stellt Korrekturdaten zur Verfügung, die die Genauigkeit von GNSS-Positionsbestimmungen von ursprünglich 3 m - 10 m auf weniger als 1 cm verbessern. Die Arbeitsgemeinschaft betreibt dazu ein bundesweites Netz von permanenten GNSS-Stationen mit einem mittleren Stationsabstand von 30 km - 40 km. Seit Beginn der 2000er Jahre werden die Daten der GNSS-Stationen archiviert; damit stehen neben der hohen Genauigkeiten in Lage und Höhe auch Koordinatenzeitreihen mit hoher zeitlicher Auflösung zur Verfügung. Die Zeitreihen besitzen einen großen Informationswert für die Untersuchung von natürlichen oder anthropogenen Deformationen der Erdoberfläche, allerdings nur an wenigen Punkten.

Mit der satellitengestützten Radarinterferometrie (InSAR) steht eine Möglichkeit zur flächen-deckenden Erfassung von Bewegungsvorgängen an der Erdoberfläche mit einer zeitlichen Auflösung von mehreren Tagen und einer Genauigkeit von 1 cm - 3 cm bereit. Im Gegensatz

zu GNSS ist die Lage natürlicher langzeitstabiler Rückstreuer (Persistent Scatterer, PS), die zur Erstellung von Zeitreihen der Bodenverschiebung aus Radarbildern verwendet werden, jedoch nicht genau bekannt. Die PS-Punkte etablieren sich an festen Strukturen wie Gebäuden, Infrastruktur oder Felsen und werden erst bei einer Auswertung umfangreicher Bildstapel "sichtbar"; eine nachträgliche Einmessung der Punkte ist im Allgemeinen nicht möglich. Die Genauigkeit, mit der die PS-Punkte georeferenziert werden, hängt von der räumlichen Auflösung des SAR-Sensors, dem Aufnahmemodus und der Genauigkeit der Satellitenorbits ab.

Die Kombination von GNSS und SAR-Interferometrie stellt ein großes Potential für die Landesvermessung dar, zu deren Aufgaben unter anderem die Überwachung von Verdachtsgebieten auf Bodenbewegungen gehört. Zur besseren Verknüpfung der beiden Techniken können Corner-Reflektoren eingesetzt werden. Corner-Reflektoren stellen künstliche PS-Punkte dar, deren Phasenreferenzpunkt mit Standardabweichungen von 5 mm - 7 mm (absolut) und 1 mm (relativ) eingemessen werden kann (Bähr und Schenk, 2010). Über Verbindungsmessungen zu benachbarten GNSS-Antennen können beide Datensätze in ein gemeinsames Datum gebracht werden. Verschiedene Landesvermessungsämter, unter ihnen das Landesamt für Geoinforma-

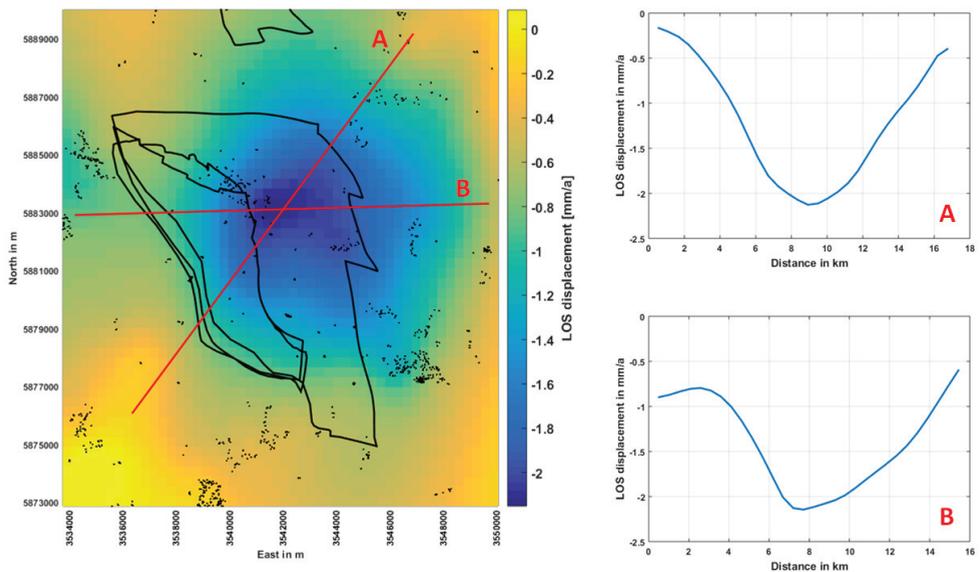


Abb. 99: Thin-plate-spline Approximation des aus der SAR-Interferometrie abgeleiteten Geschwindigkeitsfeldes über der Gaslagerstätte Söhligen (links). Schwarze Punkte geben die Lage der Persistent-Scatterer-Punkte an (Datensatz ERS-1/2, 1992 - 2001), schwarze Linien kennzeichnen den Umriss des Gasfeldes. Die roten Linien A und B geben die Lage der Profile an, die auf der rechten Seite dargestellt sind. Deutlich erkennbar ist ein trichterförmiges Absenkungsprofil über dem Zentrum der Gaslagerstätte.

tion und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL) und das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerGeo), richten derzeit Corner-Reflektoren an *SAPOS*[®]-Stationen ein.

Bei der Aufstellung der Corner-Reflektoren ist allerdings einiges zu beachten. Ein Pixel eines Radarbildes enthält die Summe der Intensitätsbeiträge aller elementaren Rückstreuer in einem bestimmten Areal (Auflösungszelle) am Boden, dessen Größe abhängig vom SAR-Sensor und dem Aufnahmemodus zwischen 1 m^2 und mehreren 100 m^2 liegt. Um Interferenzen sicher zu vermeiden, sollte kein natürlicher PS-Punkt innerhalb derselben und der benachbarten Auflösungszellen des Corner-Reflektors vorhanden sein. Ebenso sollten Zellen vermieden werden, in denen sich zwar kein PS-Punkt etabliert, die jedoch ein diffuses Signal hoher Intensität erzeugen. Aus diesen Gründen wurden im Rahmen eines studentischen Projektes in Kooperation mit dem LGL und dem LVerGeo Voruntersuchungen an potentiellen Aufstellungsorten durchgeführt.

Das Projekt wurde im Rahmen der Lehrveranstaltung Geodetic Applications of SAR interferometry im Wintersemester 2017/2018 auf Basis von Radarbildern der Satellitenmission Sentinel 1A und 1B bearbeitet. Neben dem Projektziel, der Eingrenzung geeigneter Standorte für Corner-Reflektoren, wurden weitere Fragestellungen von Gruppen von je zwei Studierenden bearbeitet:

- Welche Auswirkung hat die Wahl der Masterszene auf die Anzahl der PS-Punkte?
- Bringt eine höhere zeitliche Abdeckung von sechs Tagen (Datensätze 1A und 1B) gegenüber einer zeitlichen Abdeckung von zwölf Tagen (nur Datensatz 1A) auch einen Gewinn an PS-Punkten mit sich?
- Welche Polarisation (VV oder VH) ist besser für die PS-Analyse geeignet?

Es fanden insgesamt zehn Übungseinheiten statt, in denen die Studierenden unter Verwendung der frei verfügbaren Programme SNAP und StaMPS die Lage und Anzahl der PS-Punkte zu bestimmen hatten. Jeder Studierende bekam dazu einen teilweise vorprozessierten Datensatz von 35 bis 39 Szenen zur Verfügung gestellt. Anschließend waren die Ergebnisse zu beurteilen und Vorschläge für geeignete Aufstellungspositionen der Corner-Reflektoren zu erarbeiten.

Am 07.03.2018 fand eine Präsentationsveranstaltung statt, bei der die Studierenden in Anwesenheit von Vertretern der Vermessungs- und Katasterverwaltung Rheinland-Pfalz (VermKV) sowie des Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL) ihre Ergebnisse präsentierten. Die Abbildung 100 zeigt als Beispiel die Analyse der Situation an der *SAPOS*[®]-Station Mannheim.

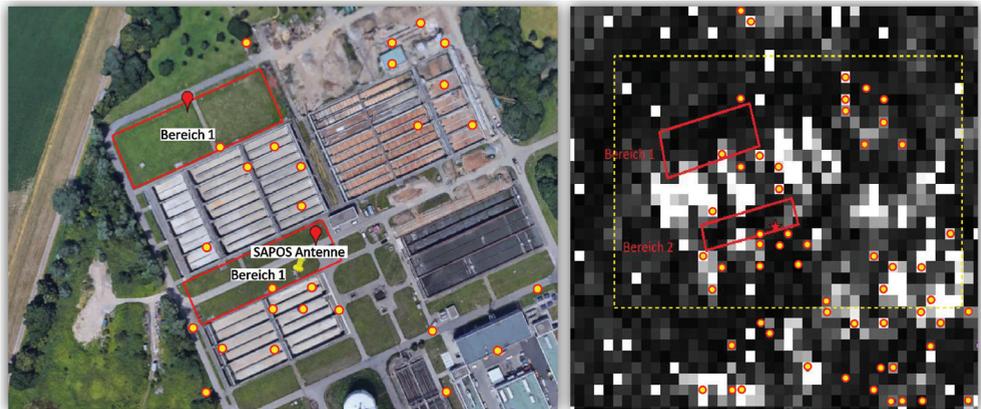


Abb. 100: Die linke Seite zeigt die auf dem Gelände der Kläranlage Mannheim detektierten langzeitstabilen Rückstreuer (PS-Punkte, gelbrote Kreise). Helle Pixel im Intensitätsbild (rechts) markieren Bereiche, aus denen viel Signalenergie zurückgestreut wird, ohne dass in jedem Fall die Kriterien für einen PS-Punkt erfüllt sind. Beides sollte in der Nachbarschaft eines Corner-Reflektors vermieden werden. Rote Rechtecke zeigen geeignete Aufstellungsorte in der Nähe der SAPOS[®]-Antenne, das gelbe Rechteck markiert den Ausschnitt der linken Abbildung (Studie im Rahmen der Lehrveranstaltung Geodetic Applications of SAR interferometry, Verena Simon, Wenxin Hu und Alexandra Heck).

4 Lehrstuhl für Vermessungskunde und Geodätische Sensorik

Maria Hennes

4.1 Messmittelentwicklungen: Linearmessbahnen und Adapter

Das GIK hat eine große Expertise in der Entwicklung und dem Bau von **Präzisions-Linearmessbahnen**. Aus den beiden am Institut installierten Systemen (vgl. Beitrag „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“ von M. Hennes in dieser Festschrift) fließt die Expertise in Auftragsentwicklungen nach Kundenwünschen ein. Eine Präzisions-Linearmessbahn wurde für einen namhaften Hersteller von Distanzmessgeräten und Scannern entwickelt. Sie wird im herstellereigenen Kalibrierlabor eingesetzt, um Zertifizierungen der dort produzierten Distanzmessmodule zu ermöglichen. Eine weitere Präzisions-Linearmessbahn befindet sich in Entwicklung für ein Geodätisches Institut, wobei auch die Baugruppen weitgehend in der mechanischen Werkstatt des GIK gefertigt werden. Diese Linearbahn wird neben der hohen Positioniergenauigkeit zusätzliche Charakteristiken aufweisen, die der aktuellen Instrumentenentwicklung gerecht werden.

A-TOM ist ein Adapter für ein weitgehend frei geführtes Messmittel, um dessen lokal ermittelte 3D-Daten (z. B. Punktwolken) in ein übergeordnetes Referenzsystem transformieren zu können. In Form eines operablen Funktionsmusters konnte nachgewiesen werden, dass A-TOM eine low-cost-Alternative zu einem kommerziellen Produkt mit annähernd gleicher Genauigkeit darstellt. Für das im Beitrag „Forschung am Geodätischen Institut“ detaillierter beschriebene System wurde ein **Patent angemeldet** (Runge, 2007).

Außerdem entwickeln und fertigen wir **Messhilfsmittel**, insbesondere Adapter, die hauptsächlich zur präzisen Antastung komplexer Objekte dienen. Hierzu zählen unter anderem auch das **Markierungswerkzeug PMM** (vgl. Abb. 101 links) und diverse, teilweise **nachführbare Reflektorhalterungen** (vgl. Abb. 101 rechts) höchster Präzision. Mit diesen Komponenten sind Markier- bzw. Zentriergenauigkeiten bis zu wenigen μm erreichbar. Auf eine Kommerzialisierung dieser Adapter in (Klein)-Serie muss aktuell vor allem mangels Werkstattkapazität verzichtet werden.

4.2 Entwicklung eines hochpräzisen Messroboters

Für die Höhenkontrolle von Hallenböden gemäß DIN entwickeln wir im Rahmen eines ZIM-Projektes (**Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand**) mit einem nationalen und einem internationalen Partner den weltweit **genauesten autonom fahrenden Messroboter**. An unserem Lehrstuhl wird der gesamte Mess- und Regelprozess unter Nutzung der statistisch gestützten Sensorfusion entwickelt und optimiert. Diese wird ein zielgerechtes Fahren ohne Rangieren und damit eine deutliche Effizienzsteigerung des bisher personalaufwändigen Messprozesses ermöglichen (vgl. Abb. 102). In der nächsten Projektphase soll dieser Roboter zur Markierung

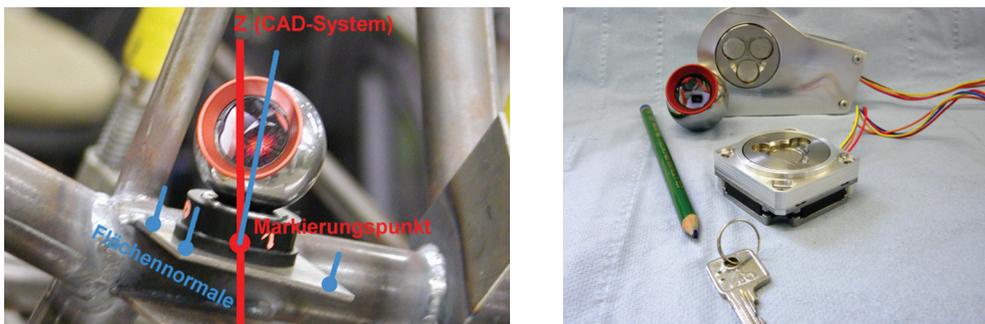


Abb. 101: Links: Markierungswerkzeug PMM (Pose Mark Mount) zur dreidimensionalen Absteckung (Markierung) von Punkten auf beliebig orientierten Flächen. Rechts: nachführbare Reflektorhalterungen (active hubs) in diversen Ausführungen.

von Bohrlöchern, Einbauwänden und ähnlichem auf (Hallen-)Böden weiterentwickelt werden. Bei diesen Robotervarianten sind Genauigkeiten von wenigen Zehntel Millimetern in Bezug auf das gesamte Messvolumen einer Fertigungshalle bzw. Fertigungsstraße gefordert. Die Bemalung von Böden (z. B. im Rasterdruck) und das Schneiden von Rasenmustern (in Form von Logos) aufgrund von digitalen Vorlagen sind als weitere Adaptionen denkbar. In jedem Fall sollen die Ausmaße dieses Roboters auf ein handliches Volumen beschränkt bleiben, das den unkomplizierten Transport als normales Fluggepäck ermöglicht (vgl. Abb. 102 unten). Der Markierungsprozess eines Punktes soll um den Faktor 10 beschleunigt werden, wobei gleichzeitig ein Messgehilfe entfallen kann. Außerdem soll der Roboter selbst weitgehend eigenständig arbeiten, weswegen sich der betreuende Vermessungsingenieur zeitgleich anderen Aufgaben zuwenden kann.

Bereits erhältliche Robotermodelle (beispielsweise für das autonome Rasenmähen) sind aufgrund ihrer Konstruktion grundsätzlich nicht geeignet, um das schnelle und damit notwendigerweise rangierfreie Anfahren von Punkten zu gewährleisten. Deswegen wird zum



Abb. 102: Oben: bisherige personalintensive Situation: Höhenbestimmung und Markierung (Quelle: Vermessungsbüro Lingel). Unten: Einsatzszenario und Konstruktionszeichnung des derzeit am GIK in Entwicklung befindlichen nahezu personal-unabhängig arbeitenden Höhenmess- bzw. Markierungsroboters, der bis zu 70% des Personalbedarfs spart.

einen die Hardware neu konzipiert, wobei auch eine Adaption der Antriebskomponenten erforderlich ist. Zum anderen werden spezielle Navigationsalgorithmen basierend auf der **Sensorfusion** entwickelt, die Positions- bzw. Poseninformationen von klassischen geodätischen Instrumenten wie Tachymetern sowie von Lasertrackern, Inertialnavigationssystemen und Triangulationssensoren zu einer genauen und zuverlässigen Steueranweisung für den Roboter kombinieren.

Dazu müssen alle beteiligten Sensoren hochgenau synchronisiert sein. Die nicht-geodätischen Sensoren sind dazu a priori geeignet. Einer der drei führenden Hersteller von Lasertrackern unterstützt die Synchronisierung durch ein frei zugängliches Triggersignal, alle anderen Anbieter polarer Messsysteme haben bisher ihr Instrumentenangebot noch nicht auf diese Anwendung ausgelegt. Jedoch arbeiten wir mit der Entwicklungsabteilung eines Herstellers von Robottachymetern eng zusammen, wobei eine grundlegende Modifizierung der geräteinternen Betriebssoftware erfolgen soll, um zukünftig den in diesem Projekt geforderten, aber auch anderen anspruchsvollen Anforderungen an die Synchronisierbarkeit gerecht werden zu können. Dies geschieht aufbauend auf einer Bachelorarbeit von cand. geod. Bertels (2018), der zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Beitrags die raumzeitlichen Eigenschaften der derzeit bestgeeigneten Robottachymeter untersucht.

4.3 Studien für die Meyerwerft

Es besteht eine enge Kooperation zur Vermessungsabteilung der Meyer-Werft. Diese Abteilung versteht sich vor allem als Technologie-Scout für die Verfahrensentwicklung zur Beschleunigung von Messprozessen, und beschäftigt sich weniger mit Standardvermessungs-

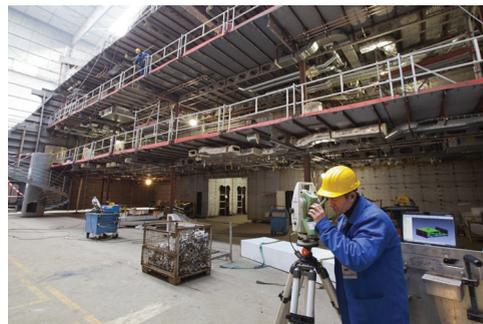
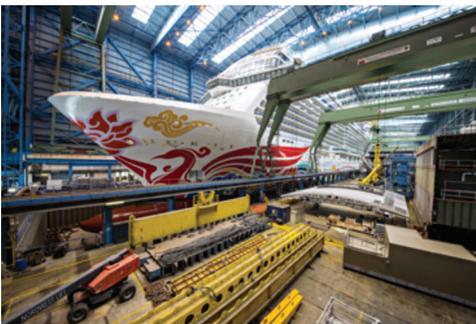


Abb. 103: Links: nahezu fertig gestelltes Kreuzfahrtschiff im Baudock der Meyerwerft. Rechts: Absteckung der Brennlinie an einem Block vor dem Fügeprozess (Quelle: Meyer Werft).

aufgaben, die weitgehend vergeben werden. In diesem Zusammenhang begutachten wir die dort entwickelten Verfahren sowie die dort gereiften Ideen. Insbesondere beschäftigten wir uns mit der Optimierung der Absteckung der Brennlinie sowie der Qualitätssicherung bei der Fügung von Segmenten und Blöcken (vgl. Abb. 103). Effiziente Blockaufstellprozesse im Schiffbau erfordern ausgeklügelte und qualitativ hochwertige Vermessungsleistungen, die sowohl einem hohen Zeitdruck (teilweise mit Echtzeitanspruch) genügen müssen. Außerdem sollen sie von wenig geschultem Personal fehlerrisikofrei bedient werden können. Wir unterstützten daher unter anderem die Entwicklung eines Multisensorsystems, das die herkömmlichen Blockausrichteprozesse vereinfacht. Weil sich durch unsere Gutachtertätigkeit ein Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Werften ergibt, sind wir zur Geheimhaltung von Details verpflichtet.

4.4 Verfahren zur Qualitätssicherung von Compact Antenna Test Ranges

Dieses Projekt stellte sich zunächst als simple Formerkennungsaufgabe im Hochpräzisionsbereich, die darauf abzielen sollte, bei mehreren Zylinderparabolen die Lage- und Orientierungsabweichung von einzelnen Formelementen zu bestimmen, um eine Nachjustierung der Kacheln zur Annäherung an das durch die Konstruktionsdaten vorgegebene Parabol zu erreichen. Die erste Herausforderung bestand darin, dass die spiegelnde Oberfläche keine reflektorlose Vermessung erlaubte, wodurch das Antastoffset des Reflektors einzubeziehen war. Abbildung 104 zeigt die antastende Messung. Für die Tiefenkoordinate konnte eine Messunsicherheit von 15 μm erreicht werden (die Querkomponenten sind bei der Formbestimmung von flachen Objekten unkritisch). Hierbei wurde festgestellt, dass die üblichen Korrektionsverfahren durch ihre impliziten Modellannahmen zu nicht tolerierbaren Abweichungen (0,015 mm bis 0,15 mm) in den Formberechnungen führten. Im Rahmen dieser Studie wurde das Verfahren zur Offsetkorrektur so optimiert, dass die Berechnung der Parabolform um nicht mehr als wenige μm verfälscht wurde.

Die zweite Innovation in diesem Projekt bestand darin, auf die *Funktion* der Zylinderparabole abzuheben. Diese Funktion besteht darin, eine Kugelwelle (wie sie üblicherweise auch bei GNSS-Antennen-Kalibrierkammern ursächlich erzeugt wird) in eine planare Wellenfront (wie sie zur Kalibrierung von GNSS-Antennen benötigt wird) umzuformen. Dies bedeutet, dass die Zylinderparabole durchaus von den Konstruktionsdaten abweichen können, solange sie eine parabolische Form (mit abweichender Brennweite) aufweisen. Demzufolge gliederte sich die Aufgabe in zwei Schritte: (a) Berechnung eines bestanpassenden Parabols und (b)

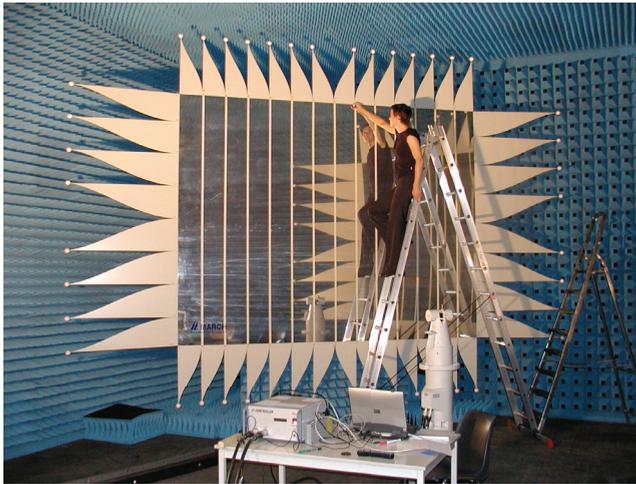


Abb. 104: Formbestimmung eines Zylinderparabols eines Compact Antenna Test Ranges.

Justierung der Strahlquelle in diesen Fokuspunkt – was wesentlich einfacher zu realisieren war als die Formänderung der Parabole. Durch diese Studie etablierte sich das Verfahren bei der ESA/ESTEC zur Qualitätssicherung ihrer Compact Antenna Test Ranges (Juretzko u. a., 2006).

4.5 FLIC zur speditiven Freiformflächenerfassung

Durch die Studien für die Qualitätssicherung für Compact Antenna Test Ranges wurde die Notwendigkeit der im ursächlichen Messprozess integrierten Reflektor-Offsetkorrektur bei der Vermessung von Freiformflächen erkannt. Diese Korrektur kann bei Kenntnis der Flächennormalen durchgeführt werden. Um aus (wenigen) bereits vermessenen Punkten der Parallelfläche die Flächennormalen ableiten zu können, eignen sich NURBS-basierte Algorithmen, wie sie in der Computer Vision zur Darstellung von Schatten verwendet werden (Hennes, 2009). Eine derartige Bibliothek wurde in den Datenfluss der Messwerverfassung mit Lasertrackern eingehängt, sodass neben den Rohdaten simultan die offsetkorrigierten Koordinaten der physikalischen Oberfläche zur Verfügung stehen. Dieses Softwaretool FLIC (Free-form surface recording with Lasertracker and Implemented CCR-correction) (vgl. Abb. 105) mit WYSIWYG-Funktionalität exportiert in gängige CAD-Formate, also auch unmittelbar in die für den Maschinenbau üblichen Formate IGES und STEP. Das Softwaretool wurde an der Vermessung einer Segeljolle getestet: Alle Boote müssen üblicherweise vor jeder



Abb. 105: Regattajolle im Einsatz (links) und bei der klassischen händischen Vermessung (Mitte); Aufbau von FLIC (rechts).

Regatta einzeln in unterschiedliche Messrahmen eingespannt und über Stichmaße in Bezug zum Regattareglement überprüft werden (vgl. Abb. 105 Mitte). Durch die Vermessung mit einem Lasertracker in Verbindung mit FLIC würde der Prozess erheblich flexibler und vor allen Dingen beschleunigt. Das Produkt FLIC wurde von einem Diplomanden entwickelt, der es als Applikationsingenieur zu einem namhaften Lasertrackerhersteller mitnahm.

4.6 Präzisionsvermessungen am KATRIN-Experiment

Im Rahmen dieses Experiments fielen eine Vielzahl von Vermessungsaufgaben an, von denen die herausragendsten im Abschnitt „Forschung am Geodätischen Institut“ in dieser Festschrift beschrieben sind, da sie jeweils mit der Entwicklung von spezifischen Verfahren oder/und Messwerkzeugen einhergingen. Natürlich waren im Rahmen dieser Tätigkeiten immer wieder Präzisionsnetze zu vermessen, wobei einer der wesentlichen Ansprüche auf die Schaffung von einem stabilen Netz unter Berücksichtigung erheblich einschränkender Sichtverbindungen lag. Die noch größere Herausforderung lag darin, die Punktadaption an das Objekt mit der geforderten Genauigkeit zu realisieren, weil Objektkomponenten aneinander auszurichten waren, deren Bezugssystem zunächst durch eine geeignete Formerfassung hergestellt werden musste. Beispielsweise zeigt Abbildung 106 einen (von hunderten) Bolzen, dessen räumliche Position und Ausrichtung so genau erfasst werden musste, dass die Montierung mehrere Meter langer Baugruppen sichergestellt werden konnte. Eine besondere Schwierigkeit hierbei waren Reinraumbedingungen, die beispielsweise ein Einbringen von geklebten Werkzeugen untersagten.



Abb. 106: Bolzen und Vermessung unter Reinraumbedingungen.

4.7 Monitoring von Belastungsversuchen an einer Brücke

An der Karlsruher Rheinbrücke führen wir im Rahmen von Belastungsversuchen Deformationsmessungen für die Versuchsanstalt Stahl, Holz und Steine des KIT durch (Abb. 107 links), wobei mit zwei synchronisierten Tachymetern Messungen vor, während und nach dem Belastungsfall vorgenommen werden. Die Deformationen werden als Zeitreihen mit einer Frequenz von etwa 10 Hz in Relation zu einem Widerlager und zu einem Pylon ermittelt. Erste Ergebnisse (vgl. Abb. 107 rechts) zeigen neben Ausschlägen, die eindeutig einem einzelnen Fahrzeug zugeordnet werden können, ein langsames Schwingen, das nicht zwingend den Überfahrten einzelner Fahrzeuge zugeordnet werden kann, sondern mit der Brückendynamik

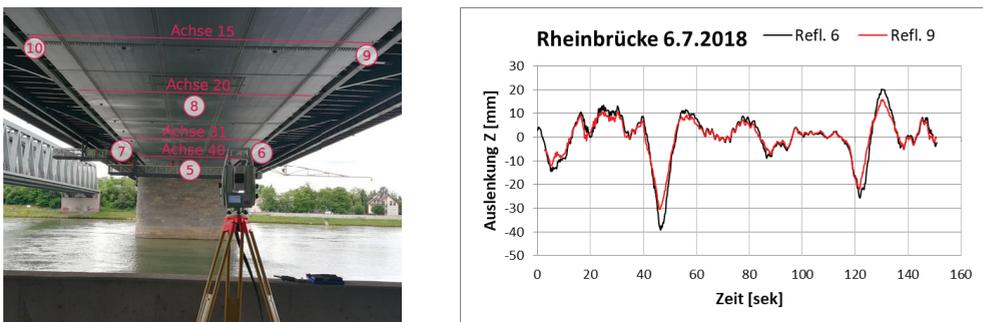


Abb. 107: Messanordnung (links) und Deformation an zwei synchron beobachteten Brückenpositionen (6 und 9) während der Belastung (rechts).

erklärbar sein könnte. Zum Zeitpunkt der Drucklegung sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen.

4.8 Innovationsbeiträge zu KA-RaceIng

Mit der Beteiligung an KA-RaceIng wird die Innovation im interdisziplinären Bereich in speziellem Maße vorangetrieben. KA-RaceIng ist ein Team von derzeit etwa 90 Studierenden unterschiedlicher Fachrichtungen, die jedes Jahr in Eigenregie einen Rennwagen entwickeln, konstruieren und fertigen. Sie starten damit jährlich beim Konstruktionswettbewerb "Formula Student". Während der Konstruktion und Fertigung fallen auch Vermessungsaufgaben an, die von uns und vor allem unseren Studierenden begleitet bzw. übernommen werden. Beispielsweise galt es, die Bohrungen der Radaufhängungen am Fahrwerk abzustecken (vgl. Abb. 108 links), den Schaumstoffabdruck für die Entwicklung des Sitzes zu scannen, zu modellieren (vgl. Abb. 108 rechts) und als konstruktionstaugliches IGES-Format abzulegen, die Lage der Achsschenkel zu bestimmen (Abb. 109 links) oder die Fertigungsqualität der Monocoque-Halbschalen in Bezug auf die Konstruktionsdaten zu prüfen (Abb. 109 rechts).

Der besondere Reiz an diesem Projekt ist, dass vermessungstechnische Kompetenz von Studierenden an Studierende anderer Fachrichtungen weitergegeben wird und in der Umkehrung Geodäsiestudierende in den Fertigungsprozess mit allen Randbedingungen der Praxis wie Zeitdruck, Materialengpässe etc. eingebunden sind. Darüber hinaus können solche Vermes-

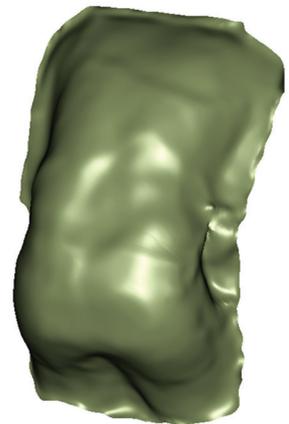


Abb. 108: Links: einige der abgesteckten Bohrungen am Rahmen. Rechts: aus Scandaten rekonstruiertes Modell des Abdrucks als Grundlage für die Konstruktion der Sitzschale.

sungsaufgaben nur mit modernsten Technologien, hohem messtechnischen Sachverstand und gleichwohl interdisziplinärer Denkweise zielführend wahrgenommen werden. Ein klein wenig darf man stolz sein, wenn das KA-RaceIng-Team in den letzten Jahren im "Formula Student" die vorderen Plätze belegt hat.

4.9 Bereitstellung von Referenzwerten und Messmittelprüfungen

Insbesondere zur Rückführung von Distanzen bestimmen wir im Kundenauftrag **Referenzwerte von Vergleichsstrecken**. Die Rückführung wird durch ein kalibriertes bzw. rückgeführtes Präzisionsmessmittel gewährleistet, wobei das Offset des Referenzgerätes aus geometrischen Restriktionen (Selbstkalibrierung) bestimmt wird und der Maßstab des Referenzgerätes entweder durch Maßstabskalibrierung in Bezug auf DCF77 oder durch eine zertifizierte Rückführungskette abgeleitet wird.

Messmittelprüfungen als Dienstleistung führen wir insbesondere für Spezialaufgaben durch, für die in der Regel kein anderes Labor einen Prüfprozess anbietet. Entsprechende Prüfvorgänge werden zielorientiert entwickelt. Etwa für die Bestimmung der Additionskonstanten eines SICK DME500 (Abb. 110 links) war der Bezug zur Frontplatte gefordert, da das Gerät keine übliche Zentrierungseinrichtung aufweist. Die Herausforderung lag in der Bestimmung des Korrekturmaßes, was sich ohne Lasertracker noch als relativ aufwändig erwies (vgl. Abb. 110 rechts).

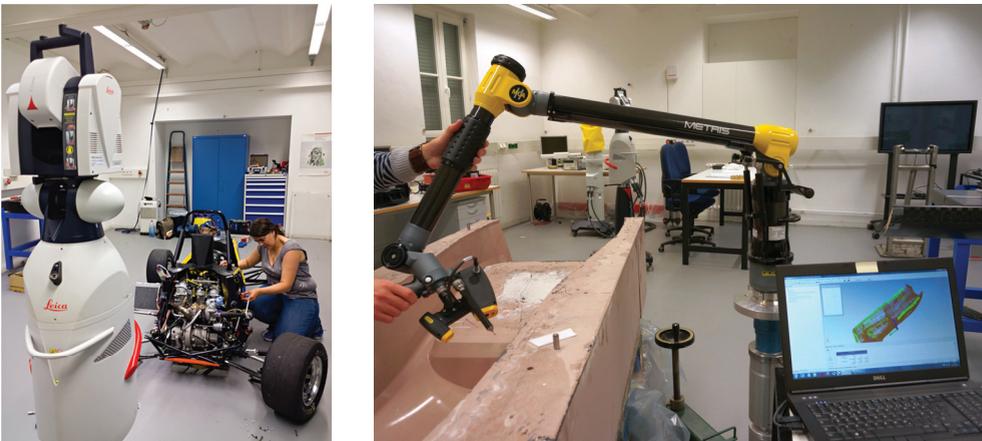


Abb. 109: Links: Einmessung der Achsschenkel beim Rennwagen mittels Lasertracker. Rechts: Kontrollmessung der Monoque-Halbschalen mittels Messarm und Linienscanner.

Derartige Spezialprüfungen werden unter anderem vom Auftraggeber mit (Dauer-)Leihgaben von Instrumenten entschädigt, die im Rahmen unseres Budgets absolut unerschwinglich sind. Diese Instrumente werden in Forschung und Lehre eingesetzt. Im größeren Umfang (bzw. für größere Stückzahlen) prüfen wir Präzisionsreflektoren unterschiedlicher Bauart kommerziell. Auf die kommerzielle Durchführung gesetzlich vorgeschriebener Prüfungen geodätischer Instrumente verzichten wir, da sie aufgrund des Personalaufwandes unrentabel sind. Details finden sich im Beitrag „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“ in dieser Festschrift.

4.10 Gremien- und Normenarbeit

Internationale und nationale Normen sollen unter anderem gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse für die Gesellschaft nutzbar machen. In diesem Zusammenhang arbeiten wir im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Arbeitsausschuss Geodätische Instrumente und Geräte mit, um vor allen Dingen die Erkenntnisse aus Kalibrierung und Qualitätssicherung (vgl. Beitrag „Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen“) der Allgemeinheit zugänglich zu machen. In den letzten Jahren sind hierbei einige Normen zur Feldprüfverfahren (insbesondere die DIN ISO 17123-Reihe) überarbeitet bzw. mit der internationalen Normung vereinheitlicht worden. Durch Mitarbeit im internationalen (Spiegel-)Ausschuss ISO /TC 172/SC6 sowie entsprechenden Stellungnahmen zu Normentwürfen können wir die Internationalisierung der getroffenen Regelungen gewähr-



Abb. 110: SICK DME500 mit Langlochmontierung (links) und mit Dreifußadaption (rechts).



Abb. 111: Siegel der GKGM.

leisten. Im VDI/VDE²-GMA³ Fachausschuss 3.34 Large Volume Metrology im Fachbereich Fertigungsmesstechnik arbeiten wir an einem Regelwerk zur Large Volume Metrology mit. Um den teilweise langwierigen administrativen Abläufen bei der Normung entgegen zu wirken, arbeiten wir an Merkblättern des DVW zur Instrumentenprüfung mit. Siehe hierzu im Beitrag „Forschung am Geodätischen Institut“ den Unterpunkt „Prüfung und Kalibrierung von Tachymetern“ auf Seite 154 für nähere Details. Darüber hinaus besteht auch eine enge Zusammenarbeit mit der PTB.

Den Transfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen in die Praxis hat sich auch die Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel e. V. (GKGM) zum Ziel gesetzt und in ihrer Satzung festgelegt. Aufgrund unserer gediegenen Laborausstattung dürfen wir uns zu den Gründungsmitgliedern zählen und unterstützen die Arbeit durch wissenschaftliche Beiträge zu internen und extern gerichteten Veranstaltungen. Instrumentenprüfungen mit dem GKGM-Siegel (Abb. 111) gewährleisten die Überwachung des Prüfverfahrens durch die GKGM.

Literatur

- Bähr, H. und Schenk, A. (2010): Präzise Vermessung des Phasenreferenzpunktes von Corner-Reflektoren. Hrsg. von K. Zippelt. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik / Karlsruher Institut für Technologie*, vol. 2010.3. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S. 13–24. ISBN: 978-3-86644-576-5. DOI: 10.5445/KSP/1000020074.
- Bertels, M. (2018): Evaluierung der Leistungsfähigkeit einer Roboter-Totalstation zur Objektverfolgung in Echtzeit. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 78 S.
- Bouman, J., Ebbing, J., Fuchs, M., Sebera, J., Lieb, V., Szwillus, W., Haagmans, R. und Novák, P. (2016): Satellite gravity gradient grids for geophysics. *Nature Scientific Reports* 6:21050. DOI: 10.1038/srep21050.
- Denker, H. (2006): Das Europäische Schwere- und Geoidprojekt (EGGP) der Internationalen Assoziation für Geodäsie. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 131(6):335–344.
- Fecher, T., Pail, R. und Gruber, T. (2017): GOCO05c: A New Combined Gravity Field Model Based on Full Normal Equations and Regionally Varying Weighting. *Surveys in Geophysics* 38(3):571–590. DOI: 10.1007/s10712-016-9406-y.
- Forsberg, R. und Tscherning, C. C. (1997): Topographic effects in gravity field modelling for BVP. In: Sansò, F., und Rummel, R. (Hrsg.) *Geodetic boundary value problems in view of the one centimeter geoid, Lecture Notes in Earth Sciences*, vol. 65. Springer Berlin Heidelberg, S. 239–272. DOI: 10.1007/BFb0011707.
- Freiberger Junior, J. (2007): Investigações para a Calibração Relativa de Antenas de Receptores GNSS. Portugese. PhD Thesis (Doctorate in Geodetic Sciences), Federal University of Paraná, Curitiba, UFPR.
- Freiberger Junior, J., Heck, B., Pereira Krueger, C., Mayer, M. und Seitz, K. (2005a): Estimacão do centro de fase médio de antenas GPS. *Série em Ciências Geodésicas: As Ciências Geodésicas nas Políticas de Desenvolvimento* 5:36–48.
- Freiberger Junior, J., Mayer, M., Seitz, K., Heck, B. und Krueger, C. P. (2005b): Calibração de antenas GPS em diferentes estações. *Boletim de Ciências Geodésicas* 11(2):157–178.

² VDE: Verband der Elektrotechnik-Elektronik-Informationstechnik e. V

³ GMA: Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik

- Freiberger Junior, J., Seitz, K., Nuckelt, A. und Knöpfler, A. (2007): Calibração de antenas GPS no Instituto de Geodésia de Karlsruhe. Portuguese. Scientific report, Geodetic Institute, University Karlsruhe (TH) & LAGE UFPR, S. 21.
- Fritzensmeier, K., Haupt, M., Hülse, R., Hustedt, H., Kowalewski, D., Mayer, M. und Peth, U. (2017): GNSS-Einsatz in der Netzdokumentation der Energieversorgung. DVW-Merkblatt 13. URL: <https://www.dvw.de/merkblatt> (besucht am 01. 10. 2018).
- Grombein, T. (2017): Gravity forward modeling with a tesseroid-based Rock-Water-Ice approach – Theory and applications in the context of the GOCE mission and height system unification. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*, no. 2017/1. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. DOI: 10.5445/KSP/1000068500.
- Grombein, T., Luo, X., Seitz, K. und Heck, B. (2014): A wavelet-based assessment of topographic-isostatic reductions for GOCE gravity gradients. *Surveys in Geophysics* 35(4):959–982. DOI: 10.1007/s10712-014-9283-1.
- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2013): Optimized formulas for the gravitational field of a tesseroid. *Journal of Geodesy* 87(7):645–660. DOI: 10.1007/s00190-013-0636-1.
- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2016): The Rock-Water-Ice topographic gravity field model RWI_TOPO_2015 and its comparison to a conventional rock-equivalent version. *Surveys in Geophysics* 37(5):937–976. DOI: 10.1007/s10712-016-9376-0.
- Heck, B. und Grüniger, W. (1987): Modification of Stokes's integral formula by combining two classical approaches. In: Proceedings of the IAG Symposia, XIXth General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Vancouver/Canada, 10-22 August 1987, Paris 1988, Tome II, S. 319–337.
- Heck, B. und Seitz, K. (2007): A comparison of the tesseroid, prism and point-mass approaches for mass reductions in gravity field modelling. *Journal of Geodesy* 81(2):121–136. DOI: 10.1007/s00190-006-0094-0.
- Hennes, M. (2009): Freiformflächenerfassung mit Lasertrackern – eine ergonomische Softwarelösung zur Reflektoroffsetkorrektur. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2009(5):188–194.
- Huinca, S. C. M. (2014): Análise de Influências Ambientais na Calibração de Antenas de Receptores GPS. Portuguese. PhD Thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Huinca, S. C. M., Krueger, C. P., Heck, B., Mayer, M. und Knöpfler, A. (2016): BCAL/UFPR: The GNSS Antenna Calibration Service of Latin America. In: *IAG 150 Years: Proceedings of the IAG Scientific Assembly in Postdam, Germany, 2013*. Hrsg. von C. Rizos und P. Willis. Cham: Springer International Publishing, S. 603–609. DOI: 10.1007/1345_2015_21.
- Huinca, S. C. M., Krueger, C. P., Mayer, M., Knöpfler, A. und Heck, B. (2012): First Results of Relative Field Calibration of a GPS Antenna at BCAL/UFPR (Baseline Calibration Station for GNSS Antennas at UFPR/Brazil). In: *IAG Symposium 2009 Scientific Assembly – Geodesy for Planet Earth, vol. 136*. Hrsg. von C. Rizos und P. Willis. Cham: Springer International Publishing, S. 739–744. DOI: 10.1007/1345_2015_21.
- Juretzko, M., Richter, E., Paquay, M. und Vokuraka, V. (2006): Compact range calibration and alignment. In: Proceedings AMTA Europe Symposium 2006, Munich, May 01.-04. 2006. S. 270–275.
- Knöpfler, A., Mayer, M., Nuckelt, A., Heck, B. und Schmitt, G. (2007): Untersuchungen zum Einfluss von Antennenkalibrierwerten auf die Prozessierung regionaler GPS-Netze. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*, no. 2007/1. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- Krueger, C. P., Freiberger Junior, J., Heck, B., Mayer, M., Knöpfler, A. und Schäfer, B. (2009): Establishing A Gns Receiver Antenna Calibration Field in the Framework Of Probral. In: *Observing our Changing Earth. Proceedings of the 2007 IAG General Assembly, Perugia, Italy, July 2-13, 2007, vol. 133*. Hrsg. von M. G. Sideris. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 701–707. DOI: 10.1007/978-3-540-85426-5_80.
- Novák, P. und Tenzer, R. (2013): Gravitational gradients at satellite altitudes in global geophysical studies. *Surveys in Geophysics* 34(5):653–673. DOI: 10.1007/s10712-013-9243-1.
- Runge, P. (2007): Verfahren zur Objekterfassung. Patentneuanmeldung TOM. Angemeldet als deutsches Patent.
- Wolf, K. I. (2008): Evaluation regionaler Quasigeoidlösungen in synthetischer Umgebung. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 133(1):52–63.
- Zeimetz, P., Becker, M., Kuhlmann, H., Schön, S. und Wanninger, L. (2011): Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen. DVW-Merkblatt 1. URL: <https://www.dvw.de/merkblatt> (besucht am 01. 10. 2018).

Das Mess- und Kalibrierlabor des Geodätischen Instituts im Kontext aktueller Herausforderungen

Maria Hennes

1 Einleitung

Nicht nur im Vermessungswesen ist Qualitätssicherung eine wichtige Komponente des Qualitätsmanagements. Insbesondere Prüfprozesse in der Fertigungstechnik müssen immer enger werdenden Toleranzen gerecht werden. Daher wird der Messtechnik ein immer geringer werdender Unsicherheitsbeitrag zugestanden. Gerade hier wird die enge Verzahnung zwischen Qualitätssicherung des Objekts und der damit verbundenen Qualitätssicherung der Messtechnik selbst deutlich (vgl. z. B. DIN EN ISO 14253-1, 1999). Die in den Prüfprozessen involvierten Messmittel unterliegen also hohen Qualitäts- und damit Kalibrieransprüchen.

Eine erfolgreiche Qualitätssicherung kann nur durch die gemeinsame Betrachtung von Messmittel **und** Messprozess und somit auch von Prüfmittel und Prüfprozess erfolgen. Hier leistet die Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel (GKGM e. V.) einen wertvollen Beitrag, da sie Prüf- und Kalibrier**prozesse** im geodätischen Umfeld unter Beachtung der Prinzipien der Rückführung überwacht, beispielsweise durch gegenseitige Kontrollen mittels Ringversuchen. Jede beteiligte Institution muss zumindest für einen Messmitteltyp oder einen Messprozess Kalibrierexpertise nach den höchsten Qualitätsmaßstäben sowie entsprechende Einrichtungen in einem funktionsgerechten Labor nachweisen. Das GIK bedient hierbei den Schwerpunkt der kinematischen Kalibrierung, eine zukünftig vermehrt nachgefragte Aufgabe, der der Prozessgedanke implizit innewohnt. Es folgt damit dem Paradigmenwechsel von der statischen Vermessung zur kinematischen Vermessung. Darüber hinaus widmet sich die

Arbeitsgruppe hierbei konsequent den hohen Genauigkeitsanforderungen der Large Volume Metrology (Hennes, 2016).

Mit diesen zusätzlichen Anwenderfeldern sind dem klassischen Vermessungswesen bisher wenig geläufige Begrifflichkeiten verknüpft, die im folgenden Abschnitt dargelegt werden. Auch in Bezug auf die Kalibriereinrichtungen fokussiert dieser Beitrag auf interdisziplinäre Anwendungsfelder, wobei zunächst statische Prüfverfahren vorgestellt werden, die in den letzten Jahren am GIK implementiert wurden. Auch wenn noch klassische Prüfungen wie Additionskonstante und Frequenzprüfung sowie andere Feldverfahren durchgeführt und weiterentwickelt werden (vgl. Juretzko, 2013), liegt der Fokus des Mess- und Kalibrierlabors des GIK auf der Kinematik und Präzisionsmesstechnik.

2 Relevante Aspekte

2.1 Messunsicherheit und Genauigkeitsmaße nach Herstellerangaben

Hersteller nicht-geodätischer Instrumente und Sensoren verwenden ein breites Spektrum hinsichtlich Genauigkeitsangaben, das von einer unspezifischen allgemeinen Standardabweichung über sehr detaillierte Angaben über Wiederholgenauigkeit, Reproduzierbarkeit, Linearität, Drifterscheinungen unterschiedlicher Genese usw. reicht. Dies wäre auch für geodätische Instrumente wünschenswert, weil nur dies die optimale Verwendung eines Instruments in spezifischen Messanordnungen garantiert. Stattdessen ziehen sich die Hersteller geodätischer Instrumente in der Regel auf allgemeine Genauigkeitsangaben zurück, die jedoch immer dann Vergleichbarkeit garantieren, wenn sie gemäß den Feldprüfverfahren der DIN-ISO 17123-Reihe ermittelt worden sind (ISO 17123, 2001). Diese Angabe kann natürlich nicht die in einer spezifischen Verwendung erzielte Messgenauigkeit abdecken. Hier ist die Messunsicherheit (vgl. BIPM (2012) oder als deutsche Fassung DIN EN ISO 13005 (1999)) die einzig wirklich belastbare Größe – auch wenn sie sich in der Geodäsie nur recht zaghaft durchsetzt (vgl. Hennes, 2013, 2007b; Hennes und Heister, 2007). Prüf- und Kalibrierprozesse sollen den einzelnen Beiträgen zur Messunsicherheit Rechnung tragen.

2.2 Kalibriertypen

Über viele Jahre konzentrierten sich die Kalibrieraktivitäten im Vermessungswesen auf einzelne Komponenten von Messmitteln; die Komponentenkalibrierung galt als das Maß aller Dinge. Mit der Diskussion um die Kalibrierung von Nivellierlatten, die stark in den Vorläufergremien der GKGM geführt wurde, fand die Systemkalibrierung Akzeptanz, bei der das Zusammenwirken von schwierig trennbaren Prozessen in Instrumenten und Messmitteln betrachtet wird. Heute ist bei der Wahl des angemessenen Kalibriertyps die Tendenz zur zielorientierten Einzelfallentscheidung deutlich (vgl. Hennes und Ingensand, 2000).

Mit zunehmendem Anspruch an die Kalibrierleistung wird die Bereitstellung ausreichend stabiler Referenzen immer schwieriger. Simultankalibrierungsverfahren basieren auf geometrischen Restriktionen und erlauben es, gleichzeitig mit der Kalibrierung des Prüflings auch Referenzwerte zu bestimmen. Derartige Verfahren werden am GIK entwickelt, vgl. die Beispiele in den Abschnitten 3.8 und 3.6. Der Wunsch des Praktikers, dass eine Kalibrierung völlig ohne zusätzliche Einrichtung erfolgt, wird durch die Selbstkalibrierung erfüllt, wie beispielsweise durch Zwei-Lagen-Messung. Selbstkalibrierungsansätze basieren in der Regel auf eine oder mehreren geometrischen Restriktionen, siehe unten.

2.3 Rückführung

Unter Rückführung versteht man den Vergleich des Messwertes einer Messeinrichtung oder einer Maßverkörperung mit dem nationalen Normal in einem oder mehreren Schritten. Diese Schritte beinhalten den Vergleich mit abgeleiteten Normalen, also Referenzmesseinrichtungen oder Maßverkörperungen, die letztendlich vom nationalen Normal abgeleitet sind. Auf die Rückführung wird insbesondere in Messprozessen des Maschinenbaus Wert gelegt. Das Wörterbuch der Metrologie ((VIM), Brinkmann, 2012) definiert das Kalibrieren als eine *„Tätigkeit zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen den ausgegebenen Werten eines Messmittels [...] und den bekannten Werten der Messgröße unter bekannten Bedingungen.“* Dabei wird der bekannte Wert der Messgröße von einem Normal höherer Ordnung abgeleitet. Kalibrierung stellt lediglich die Abweichung des individuellen Messmittelexemplars in Bezug auf die bekannten Bedingungen fest. Damit also ist weder eine Verifikation der Spezifikationskonformität gegeben noch eine Aussage für abweichende Messbedingungen oder auftretende Driften getroffen worden, siehe oben.

2.4 Geometrische Restriktionen

Das Normal höherer Ordnung kann auch in einer geometrischen Restriktion bestehen, zum Beispiel, dass die Winkelsumme in einem Dreieck 200 gon ergibt. Kreise, Ebenen oder Kugeln definieren ebenfalls geometrische Restriktionen, wobei der Vorteil in einer meist einfachen oder einfacheren technischen Realisierung der Figur liegt. Nachteilig kann die Beschränkung auf kleine Ausschnitte des Arbeitsbereiches des Messmittels wirken.

2.5 Latenzzeiten und Synchronisation

Die raum-zeitliche Erfassung von Objekten bekommt einen immer größeren Stellenwert. Deswegen sind Prüf- und Kalibrierverfahren zu entwickeln, die speziell auf das richtige Zusammenwirken der räumlichen und zeitlichen Messwerte abzielen. Neu wird nun nicht eine einzelne Messgröße betrachtet, sondern ein Quadrupel aus drei Raumkoordinaten und einer Zeitkoordinate (4D) oder gar die Pose mitsamt Zeitkoordinate (7D). Jede der geometrischen Koordinaten muss synchron, also zeitgleich mit der Zeitkoordinate oder zumindest exakt zeitgleich in Bezug auf ein definiertes (Trigger-)Signal, erfasst werden. Dies bedeutet, dass diese Zeitgleichheit nun auch ein Prüf- bzw. Kalibrierkriterium ist. Werden Zeitstempel (anstelle des Triggersignals) verwendet, muss sichergestellt sein, dass die Uhren der Zeitstempelgeber exakt synchron laufen. Für die Prüfung bedeutet dies, dass auch diese Forderung geprüft werden muss, und weiterhin, dass das Prüfmittel mit dem eigentlichen Messprozess synchronisiert sein muss. Unabhängig davon, ob das Messgerät aufgrund von Triggern eine Messung auslöst oder ob es Messungen mit Zeitstempeln versieht, ist immer die so genannte Latenzzeit zu betrachten, die sich aus den Verzögerungen zwischen Messwertanforderung (bzw. Stempelung) und der eigentlichen Messwertermittlung ergibt. Prinzipiell können die Ablagen eines kinematischen (raum-zeitlich erfassenden) Messmittels dem Raum oder der Zeit zugeschrieben werden; welche Variante gewählt wird, hängt vom Einsatzzweck des Messmittels ab.

3 Neue Prüfmittel und Prüfverfahren am GIK

3.1 Strategische Ausrichtung

In den letzten 17 Jahren wurde das Kalibrierlabor konsequent bezüglich der aktuellen und zukünftigen Erfordernisse der Messtechnik weiterentwickelt. Dem großen Bedarf an dimensionellen, aber nicht zwingend geodätischen Prüfungen und Kalibrierungen wurde Rechnung

getragen, unter anderem auch, um die Lücke zwischen den herkömmlichen geodätischen Prüflaboren und den Kalibrierinstitutionen des DAKKS und den Einrichtungen der PTB zu schließen. Insbesondere wird auf die Belange der Nahbereichsvermessung im industriellen Umfeld (Large Volume Metrology, LVM) fokussiert. Dabei konnte die geodätische Methodenkompetenz wirkungsvoll genutzt werden. Nutznießer des Kalibrier- und Prüfangebots sind sowohl geodätische als auch nicht-geodätische Hersteller bzw. Anwender, die sowohl das klassische als auch spezielles Messequipment verwenden bzw. anbieten.

Die Reflektorprüfung (Abschnitt 3.2) bedient sowohl Hersteller (von Low-cost-CCRs sowie von n2-Reflektoren) als auch den klassischen Ingenieurgeodäten, den die ausrichtungsabhängige Additionskonstante seines 360°-Prisma interessiert. Um den Nachteilen des empfindlichen n2-Reflektors und der großen Variabilität der Additionskonstanten bei 360°-Reflektoren entgegen zu wirken, entwickelten wir einen drehbaren Adapter, dessen Exzentrizitätsprüfung in Eigeninteresse erfolgte.

Die Weiterentwicklung der Encoderprüfung erfolgte weniger mit Blick auf klassische Teilkreisabgriffe, da diese aufgrund der werksinternen Kalibrierung den heutigen Anforderungen genügen und die Richtungsmessung eher durch unsachgemäße Adaption und/oder Anziehung/Bildauswertung beeinträchtigt werden. Lediglich die Interpolationsabweichung ist bei geodätischen Instrumenten von Interesse. Diese wird zweckmäßig mit elektronischen Kollimatoren bestimmt. Eine Prüfung eines solchen Kollimators ist in Abschnitt 3.8 beschrieben, um aufzuzeigen, dass Spezifikationen sehr sensibel interpretiert werden müssen. Die Untersuchung erfolgte in Eigeninteresse, eine Validierung mittels der METAS Schweiz bestätigte das in unserem Labor erzielte Ergebnis. Von Interesse ist jedoch die Encoderprüfung für Hersteller von Encodern und Drehtischen allgemein. Die im Labor des GIK entwickelte halbautomatische Methode (vgl. Abschnitt 3.8) führte zu Anerkennung im Bereich der Antriebstechnik (Depenthal, 2007).

Um den anspruchsvollen Anforderungen der statischen LVM zu genügen, muss auch für die dort eingesetzten Messwerkzeuge eine Prüfung erfolgen. Hierzu wurde ein Präzisionsdreharm entwickelt, der dem kommerziell erhältlichen ebenbürtig ist, vgl. Abschnitt 3.5. Aus den Erfahrungen dieser Entwicklung entstand schließlich A-TOM, ein low-cost-System zur hochgenauen Posenbestimmung, dessen Genauigkeit der kommerziellen T-Probe gleicht (Herrmann, 2016). Da Aufgaben im Maschinenbau häufig eine unmittelbare Rückführung erfordern, wurde das Labor des GIK mit entsprechenden Prüfmitteln ausgerüstet (vgl. Abschnitt 3.9). Trotzdem sollte die Expertise des geodätischen Vorgehens auch für diesen Bereich verfügbar sein, weswegen im Labor ein hochpräzises Testnetz installiert wurde, das gleich-

zeitig hinsichtlich der Kalibrierbarkeit von Lasertrackerparametern optimiert wurde (vgl. Abschnitt 3.6).

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Kalibriertätigkeit liegt auf kinematischen Messabläufen. Bevor eine Kalibrierung sinnvoll vorgenommen werden kann, müssen erst die bei einem Messmittel auftretenden Abweichungen hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit und möglichst auch hinsichtlich ihrer Ursachen untersucht werden. Dazu wurden am GIK spezielle Untersuchungseinrichtungen entwickelt und gebaut, die zukünftig auch zur Ermittlung von Kalibriergrößen benutzt werden können. Generell wurden zwei Fälle unterschieden: Untersuchung von kinematischen Phänomenen (A) ohne zeitliche Referenzierung und (B) mit zeitlicher Referenzierung (vgl. Abschnitt 2.5). Die Einrichtungen dienen teilweise auch der statischen Kalibrierung, wie die Linearbahn PHIL (vgl. Abschnitt 3.3), die aufgrund ihrer Länge von rund 24 m hervorragend geeignet ist, die distanz- und materialabhängige Additionskorrektur bei reflektorlosen Distanzmessern einschließlich Scannern zu ermitteln. Sie wird vor allem zur Realisierung von langen Trajektorien eingesetzt. Bei der klassischen Verwendung mit Interferometer gehört sie zum Typ (A), also ohne zeitliche Referenzierung, bei Kopplung mit einem Leica-Lasertracker ist auch der synchronisierte Modus (Typ B) realisiert. Ti4CalibS ist ebenfalls zeitreferenziert und liefert kreisförmige Trajektorien in unterschiedlichen Raumlagen, vgl. Abschnitt 3.4. Dieses Prüfsystem wurde zunächst im Hinblick auf die Untersuchung der kinematischen Eigenschaften von Robottachymetern entwickelt, um deren Einsatzfähigkeit in der kontinuierlichen Bestimmung von Trajektorien bewerten zu können. Gleichwohl hat Ti4CalibS aufgrund seiner präzisen mechanischen Ausführung und damit einhergehenden hohen Genauigkeit hervorragende Dienste in der Optimierung des Präzisionsmessmittels iGPS geleistet, das von vorne herein als kontinuierlich arbeitendes räumliches Positionierungssystem der LVM konzipiert wurde. Hinsichtlich der raum-zeitlichen Präzision bildet jedoch die Präzisionslinearbahn STEVE (Spatio-Temporal Evaluation Equipment) das Highlight des Labors, weil es mit dieser gelingt, selbst Präzisionsinstrumente wie Lasertracker hinsichtlich ihrer raum-zeitlichen Messunsicherheit zu untersuchen (vgl. Abschnitt 3.2). STEVE wurde in der mechanischen Werkstatt des GIK gebaut und gehört zu den weltweit genauesten Einrichtungen dieser Art. Damit hat das GIK ein Alleinstellungsmerkmal im kinematischen Prüfen.

Lasertracker besitzen einen ähnlichen mechanischen Aufbau wie Totalstationen. Neben den dort bekannten geometrischen Kalibrierparametern kommen jedoch weitere hinzu: Beim Trackermodell mit kardanisch gelagertem Ablenkspiegel sind, abgesehen von hochharmonischen Encoderabweichungen, insgesamt bis zu 16 geometrische Parameter zu bestimmen. Neben den klassischen Verfahren der 2-Lagen-Messung erfordern die Kalibrierverfahren zur Bestimmung der Parameter ausgeklügelte Punktanordnungen und mechanisches Equipment,

wie die so genannte Ballbar (vgl. Abschnitt 3.5). Auch diese wurde in der mechanischen Werkstatt des GIK in besserer Qualität als vom Originalhersteller gefertigt. Um Überprüfungen in der Fertigungsumgebung ohne Störung des laufenden Betriebs zu ermöglichen, wurde zur Etablierung von Prüfanordnungen, die die möglichst unkorrelierte Bestimmung aller Kalibrierparameter erlauben, ein spezieller Algorithmus entwickelt, der aufgrund der räumlichen Situation automatisch anhand eines CAD-Plans eine optimale Punktconfiguration berechnet (vgl. Abschnitt 3.6).

Da jedes Messergebnis eine belastbare Angabe über die Messunsicherheit benötigt, wurde für die mit Lasertrackern zu ermittelnden (auch kinematischen) objektrelevanten Zielgrößen (Form-, Posen- und Bewegungsparameter) ein Algorithmus entwickelt, der auch die Varianzen aller Kalibrierparameter vollständig auf diese Zielgrößen fortpflanzt (vgl. Abschnitt 3.6). Besondere Bedeutung hat hier die Antastabweichung und die Offsetkorrektur, die ausgiebig analysiert wurde (Naab, 2016). Da in diesem Zusammenhang insbesondere auch die Kenntnis der Reflektorqualität bedeutsam ist, entwickeln wir Prüfverfahren für kommerzielle Standardtypen (wie beispielsweise 360°-Reflektoren), Sonderanfertigungen und Eigenkonstruktionen wie Halterungen für n2-Reflektoren und automatisiert drehbare hochpräzise Reflektorträger ("active hubs"), (vgl. Abschnitt 3.7).

Für die Basismessgrößen Winkel und Strecken konzipierten wir eine modifizierte Winkelprüfeinrichtung (vgl. Abschnitt 3.8) und halten in Ergänzung zur Vergleichsstrecke Friedrichstaler Allee für den Nahbereich Lineararmessbahnen (vgl. Abschnitt 3.2 und 3.3) und für den extremen Nahbereich einen Referenzmaßstäbe und Referenzprüfkörper (vgl. Abschnitt 3.9) vor.

3.2 Raum-zeitliche Präzisionslinearbahn STEVE – zur Bestimmung des Unsicherheitsbudgets raum-zeitlicher Sensoren

Neben der Kalibrierung der statisch-geometrischen Parameter und der Latenzzeiten eines raum-zeitlichen Messmittels erhebt sich die Frage nach der Messunsicherheit, mit der eine raum-zeitliche Koordinate behaftet ist. Mit dem am GIK entwickelten k-VLT liegt zwar ein Softwaretool vor, das über Vorwärtsrechnung eine Bestimmung aus den Messunsicherheiten aller einfließenden Größen erlaubt, jedoch bleibt der Prozessgedanke noch unberücksichtigt, der das Wissen über den vorhergehenden Prozess nutzbringend einfließen lässt. Bekanntlich kann dies über Kalman-Filter erfolgen, jedoch versagen diese bei Prozessen mit nicht-stetigem Verhalten, da Kalman-Filter dann zu Überschwingern führen. Daher liegt es nahe, die Kennt-

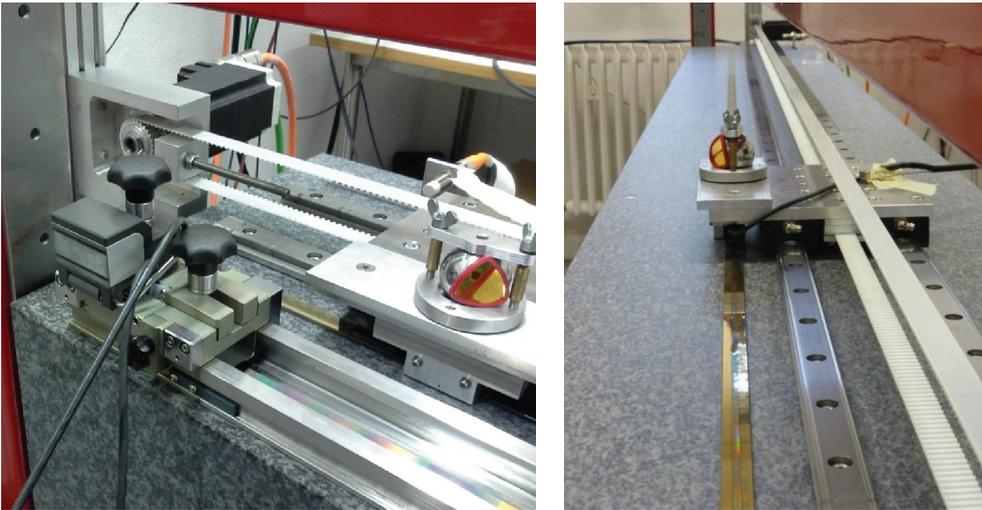


Abb. 112: Raum-zeitliche Präzisionslinearmessbahn STEVE.

nisse über den Prozess mitsamt ihrer anhaftenden Wahrscheinlichkeit mit in die Bestimmung der raum-zeitlichen Unsicherheit einzubringen, wodurch ein Überschwingen vermieden wird. Dies gelingt mit dem Bayes-Ansatz bzw. einem hybriden Filteransatz, der es erlaubt, mehr als nur ein Systemmodell zu definieren (Ulrich, 2012, 2016). Um diesen mathematischen Ansatz zu validieren, wurde im Rahmen einer Dissertation (Ulrich, 2016) eine hochpräzise Linearbahn (STEVE) aufgebaut (vgl. Abb. 112), die die notwendigen raum-zeitlichen Untersuchungen unmittelbar für Lasertrackermessungen selbst erlaubt. Damit werden von vorneherein außerordentliche Ansprüche an die Realisierung der Referenzwerte gestellt.

Da auch die interferometrische Messeinheit des Lasertrackers zu prüfen ist und die Methode der Simultankalibrierung in diesem Fall aufgrund der Variabilität der Störeinflüsse im Ausbreitungsmedium Luft nicht sinnvoll ist, wurde ein hochpräziser Glasmaßstab gewählt, den die Firma Heidenhain dankenswerter Weise mitsamt seiner Ableseeinrichtung zur Verfügung stellte, wobei dieses im Kalibrierlabor des GIK verbaute Exemplar als eines der präzisesten weltweit gilt: laut Herstellerangaben bietet das Abgriffsystem im zweiachsigen Betrieb eine Genauigkeit von $0,27 \mu\text{m}$ auf $1,5 \text{ m}$, wodurch der Glasmaßstab, der mit $1,6 \mu\text{m}/\text{m}$ spezifiziert ist, intern bei jedem Abgriff kalibriert wird. Es kann Verfahrensgeschwindigkeiten bis zu 8 m/s verarbeiten. Durch die Wahl dieses einzigartigen Messsystems musste die nutzbare Länge auf $2,5 \text{ m}$ beschränkt werden. Ein Granitblock von $1,5 \text{ t}$ als Träger minimiert die Durchbiegung.

Für die Führung des Wagens wurde ein Schienensystem mit einer spezifizierten Parallelität von $\pm 2,5 \mu\text{m}/\text{m}$ und einer Steifigkeit von weniger als $0,5 \mu\text{m}$ verbaut, um zu garantieren, dass die Relativbewegung zwischen dem auf dem Wagen mitgeführten Prisma des Prüflings und der Ableseeinrichtung möglichst vernachlässigbar wird (das Abbe'sche Komparatorprinzip konnte konstruktionsbedingt nicht eingehalten werden, da dies unter anderem zu Ausmaßen des Trägers geführt hätten, die nicht mehr hätten im Labor installiert werden können). Der Wagen wird durch ein Zahnriemensystem angetrieben, wobei die Vermeidung von Eigenfrequenzen zu einer konstruktiven Herausforderung wurde. Die verbleibende Vibration ist vernachlässigbar in ihrer Amplitude, sie liegt bei $21,7 \text{ Hz}$ und könnte bei Bedarf noch aus den Daten herausgefiltert werden. Auch wenn die Geradheit der Führung spezifiziert ist, lässt sich die Orientierung des Wagens durch kontinuierliche Abtastung mit dem Elcomat überwachen und korrigieren. Fasst man alle Unsicherheitsbeiträge zusammen, erhält man im kinematischen Betrieb während der Bewegung von bis zu 5 m/s eine Messunsicherheit für die Reflektorposition von $4 \mu\text{m}$ für $k=2$, also einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% .

Die Steuersoftware erlaubt die Generierung von beliebigen Geschwindigkeitsprofilen, wobei derzeit solche implementiert sind, die unterschiedlichen Beschleunigungsänderungen Rechnung tragen (vgl. Beispiel S-Rampe in Abbildung 113). Für ein Bewegungsprofil, das einem septischen Polynom folgt und während der Hin- und Rückfahrt je einmal Reflektorgeschwindigkeiten bis 5 m/s generiert, sind die Ergebnisse in Abbildung 114 dargestellt. Zunächst erkennt man die tatsächlichen Abweichungen des verwendeten Lasertrackers gegenüber den Sollwerten der Linearbahn (grün). Da der Lasertracker in einem seitlichen Abstand von der

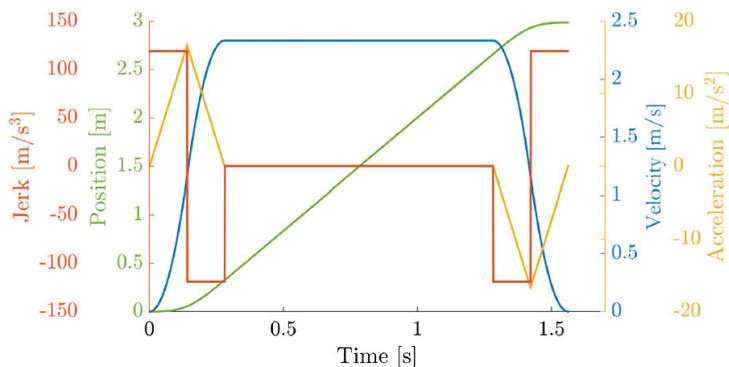


Abb. 113: Zeitliche Änderung von Position (grün), Geschwindigkeit (blau), Beschleunigung (orange) und Ruck (rot) bei einer S-Rampe (exemplarisch); (aus Ulrich, 2016).

Bahn von 3 m und in der Verlängerung von 1 m positioniert war, sind unterschiedliche Nachführgeschwindigkeiten des Lasertrackerkopfes erzwungen worden, die nicht symmetrisch dem Zeitverlauf folgen, wodurch sich auch die Abweichungen nicht völlig symmetrisch verhalten. Der anfänglich glatte Verlauf mit geringem Offset im Stillstand repräsentiert die Wiederholgenauigkeit des Lasertrackers (und des Referenzsystems).

Während der Fahrt werden die Abweichungen größer, beim Abstoppen verschwinden sie zunächst nicht vollends. In jedem Fall liegen die Abweichungen innerhalb der Spezifikation bzw. der vorwärts gerechneten Messunsicherheit für den kinematischen Fall (vgl. gelb eingezeichnetes Band in Abbildung 114, wobei die Distanzabhängigkeit an der Einbuchtung im mittleren Bereich deutlich zu erkennen ist).

Die Messung zeigt aber auch, dass mit dem neuen Bayes-gestützten Filtermodell sinnvollere Ergebnisse für die erreichte Messunsicherheit (Bandbegrenzung durch die rote Kurve) erzielt werden: Sie wird nicht zu pessimistisch angenommen wie bei der unmittelbaren Vorwärtsrechnung (gelb), folgt aber auch den auftretenden größeren Abweichungen während der Fahrt. Mit derartigen Versuchen, die alle dasselbe Verhalten zeigen, konnte die Tauglichkeit des neuen Ansatzes zur Unsicherheitsberechnung in kinematischen Prozessen gezeigt werden, was von entscheidender Bedeutung für die industrielle Fertigung mit immer enger werdenden Toleranzbändern ist.

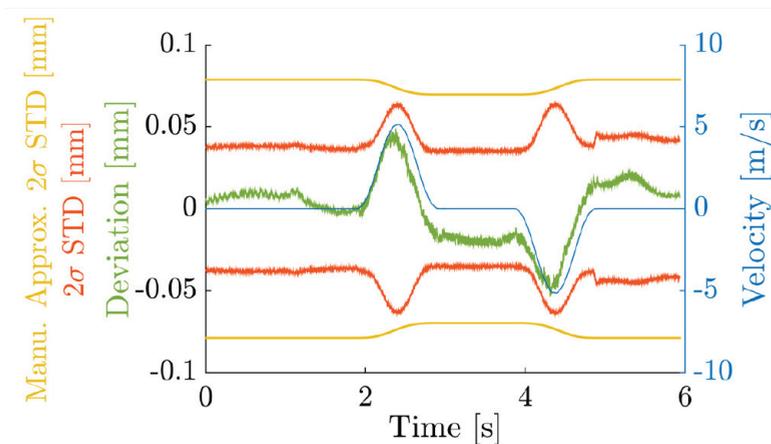


Abb. 114: Bänder der Messunsicherheit: unmittelbare Vorwärtsrechnung (gelb), Modellierung durch hybrides Filter mit mehreren Systemmodellen (rot) bei dem in blau als Geschwindigkeit dargestellten Bewegungsprofils sowie die tatsächlichen Abweichungen (grün).

3.3 PHIL – Kombiwerkzeug für statisches und kinematisches Verhalten

PHIL steht für **P**recise **H**igh-speed **L**inear track, also für Präzisions-Hochgeschwindigkeits-Messbahn. Sie ist 24 m lang und interferometrisch (also für Relativdistanzen) über das HP-Interferometer Typ Agilent 5519A in Kombination mit Agilent 10885A PC Axis Board rückgeführt. Die meteorologische Korrektur wird unter anderem über mehrere ebenfalls rückgeführte Temperatursensoren abgeleitet und erreicht eine Unsicherheit von 0,1 ppm. Die geforderten Verfahrensgeschwindigkeiten von 9 m/s bei minimaler Beschleunigungsstrecke wurden durch eine gewichtsoptimierte Wagenkonstruktion sowie vor allem durch ein neues Antriebs- und Kraftübertragungssystem gewährleistet (Abb. 115). Dieses besteht aus einem doppelt geführten Zahnriemen, der an der Vorder- und Hinterkante eines gewichtsoptimierten Messschlittens angreift.

Durch diese Art der Krafteinleitung wurde die Möglichkeit der optischen Ablotung sichergestellt, wodurch der Bezug zwischen interferometrischem Nullpunkt und Zentrierung des Prüflings unter Einhaltung des Abbé'schen Komparatorprinzips hergestellt werden kann. Insgesamt kann so für die Bestimmung der Additionskorrektur eine Unsicherheit von 0,2 mm garantiert werden, wobei der Absolutbezug zur Prüflingsstehachse in der jetzigen Ausführung den größten Beitrag zum Unsicherheitsbudget liefert. Wohl deswegen wird der Stehachsbezug nur von sehr wenigen Kalibrierlaboren realisiert.

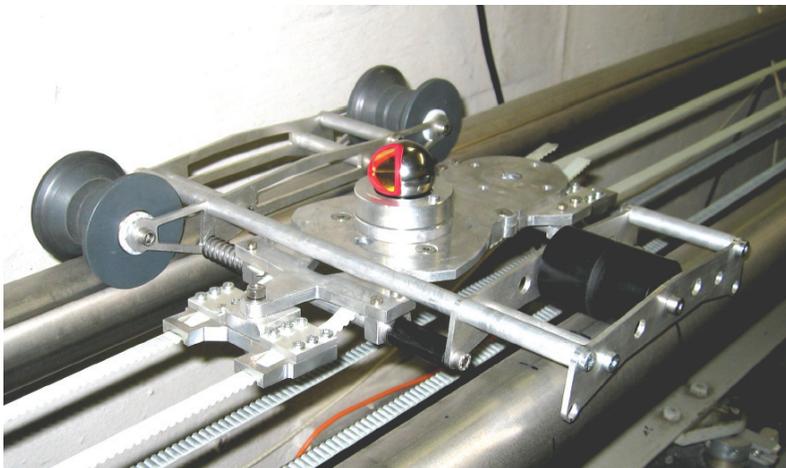


Abb. 115: Hochgeschwindigkeitsmessbahn PHIL.

Die Steuerung und die Messwerterfassung erfolgen vollautomatisch mit dem am GIK entwickelten Softwarepaket COMET-PRO (**C**ontrol and **M**Easuring **T**ool for **P**recise **R**apid **O**bject-tracking), das sowohl klassische Messabläufe mit statischer Messwerterfassung als auch kinematische Messabläufe unterstützt. Ein leicht modifiziertes Layout dieser Konstruktion wurde inzwischen für einen namhaften Hersteller vermessungstechnischer Instrumente realisiert.

In dieser Ausbaustufe ist die Untersuchung der Auswirkung der materialabhängigen Eindringtiefe bei reflektorloser Distanzmessung vollautomatisch möglich. Da die Eindringtiefe zu den limitierenden Faktoren gehört, die sich im klassischen Anwendungsfall beispielsweise bei Messungen auf Styropor in unvertretbarer Größe bemerkbar macht (vgl. Abb. 116 und Richter und Juretzko (2007)), empfiehlt sich generell die Korrektur des resultierenden systematischen, jedoch materialabhängigen Distanzmessfehlers mit einer derartig bestimmten Kalibrierfunktion. Neben Styropor sind auch andere klassische und moderne Baumaterialien wie Marmor, GFK und CFK sowie Bauschäume und Dichtmassen, als kritisch anzusehen.

In Präzisionsanwendungen (Prüfung von Rotorblättern von Windkraftanlagen, Flugzeugmontage) tauchen bei CFK-Materialien ähnliche Fragestellungen auf, allerdings in einer Genauigkeitsklasse, in der nur ein Laserradar als reflektorloses Messmittel im Bereich der LVM zum Einsatz kommen kann. Da sich die Eindringtiefe in Bezug auf die mechanische Oberfläche definiert, liegt die Herausforderung in der Gestaltung von geeigneten Testkörpern,

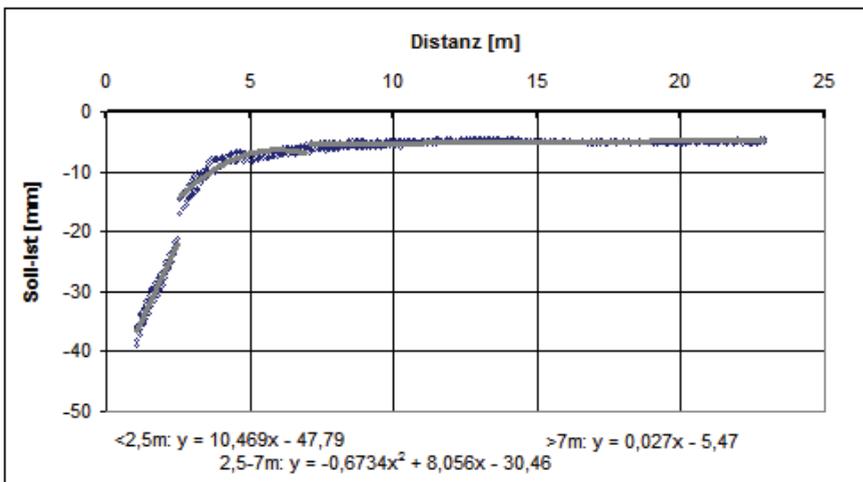


Abb. 116: Additionskorrektur reflektorlos auf Styropor.

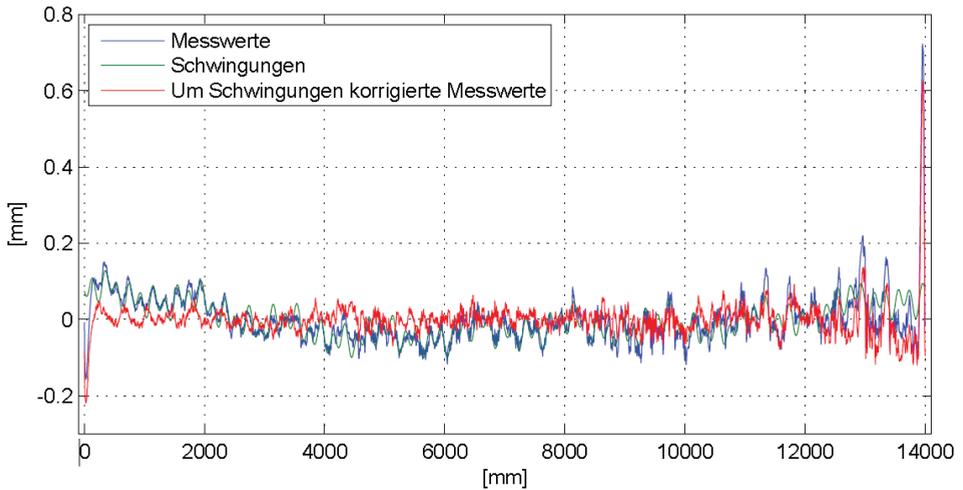


Abb. 117: Positionsabweichungen bei 1 m/s in Bezug auf Lasertrackerdaten, Rohwerte (blau) und um signifikante Abweichungen (grün) korrigierte Abweichungen (rot).

die die Verknüpfung von antastenden und berührungslosen Messprozessen im μm -Bereich ermöglichen (Naab, 2010; Hennes, 2007a).

Die Ansteuerung von PHIL erlaubt eine Positionierung des Wagens über den Zahnriemen, dessen Position mit einem Encoder auf der Antriebswelle gemessen wird. Es werden während der Fahrt (!) Positionsunsicherheiten ($k=1$) zwischen $60\ \mu\text{m}$ @ $0,2\ \text{m/s}$ und $300\ \mu\text{m}$ @ $3\ \text{m/s}$ erreicht, wobei durch Optimierung der Masse und der Aufbauten (Luftwiderstand!) die Unsicherheiten weiter vermindert werden können. Ein Beispiel für die Positionsqualität (und damit der Qualität der Arbeiten der mechanischen Werkstatt) zeigt Abbildung 117 für die Verfahrensgeschwindigkeit von $1\ \text{m/s}$. Hierbei wurden die Abweichungen der durch PHIL gelieferten Positionsdaten zu den mittels Lasertrackermessungen erhaltenen Referenzdaten ermittelt (blau) und um signifikante (und weitgehend durch die Exzentrizität der Antriebsscheibe begründbaren) periodische Anteilen (grün) korrigiert. Die rot dargestellten Abweichungen zeigen somit die Positionsgenauigkeit ohne externe Referenz im kinematischen Betriebsmodus (vgl. Günther, 2009).

Infolgedessen liegen auch im bewegten Modus raum-zeitliche Informationen vor, die aufgrund der Zeitstempelung mit dem Prüfling synchronisiert werden können, sofern der Prüfling ebenfalls über eine Zeitstempelung verfügt und die beiden Uhren aufeinander synchronisiert sind. Ein Leica-Lasertracker erlaubt die exakte zeitlichen Referenzierung durch ein Triggersignal. Dadurch entfällt die Interpolation zwischen Zeitstempeln. Dies wäre zwar auch mit

dem integrierten HP-Interferometer möglich, jedoch ist dieses auf 12fach geringere Verfahrensgeschwindigkeiten des Objekts beschränkt. Die Rückführung des Interferometers als auch der beiden am GIK vorhandenen Lasertracker ist durch entsprechende Herstellerzertifikate gewährleistet.

Ein Beispiel für die Untersuchung eines terrestrischen Laserscanners im kinematischen Betrieb, also bei bewegtem Objekt, (vgl. auch Vennegeerts u. a., 2010) zeigt die folgende Abbildung 118, in der die im Profilmodus auftretenden Abweichungen während einer Messfahrt über 15 m dargestellt sind. Bei Distanzen ab 10 m wird die Abweichung zur Referenzdistanz größer, wobei sie sich periodisch mit der Modulationswellenlänge von etwa 0,7 m wiederholt, sich also analog zum bekannten "zyklischen Fehler" bei EDM verhält. Diese Abweichung wird wahrscheinlich auch hier durch das vom EDM her bekannte optische Übersprechen verursacht, da sich die Abweichung nach der Spiegelreinigung verringert. Natürlich ist ein Übersprechen durch den Mixed-Pixel-Effekt gleichfalls nicht auszuschließen, wenn in den Nachbarbereichen des betrachteten Scan-Ausschnitts stark abweichende Reflexionseigenschaften herrschen. Dies zeigt sich dann auch in spiegeldrehzahl-abhängigen Amplituden des zyklischen Effekts. Ein ähnliches Phänomen, das zu distanzabhängigen zyklischen Abweichungen führte, die auf optisches Übersprechen hindeuten, wurde auch in einer praktischen Anwendung deutlich, wobei sich Objekt und Scanner in Ruhe befanden. Prüfungen oder gar Rekalibrierungen sind also in Abhängigkeit von Arbeitsbedingungen und Gebrauchszustand erforderlich, um Fehlinterpretationen in den Ergebnissen vorzubeugen – hier würde sich anstelle der tatsächlich planen Oberfläche eine gewellte zeigen (vgl. Abb. 118).

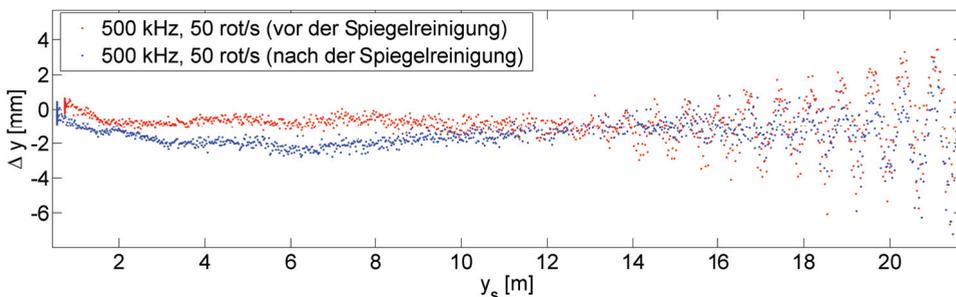


Abb. 118: Experiment zur Additionskorrektur am Beispiel eines Laserscanners im kinematischen Betrieb.



Abb. 119: Ti4CalibS des GIK, mit Komponenten des iGPS (oberes Ende und Mitte des Dreharms) und CCR (unteres Ende, optional, für simultane Vergleichsmessungen mit dem Lasertracker).



Abb. 120: GIK-Eigenkonstruktion der Ballbar.

3.4 Ti4CalibS – zur Untersuchung des zeitreferenzierten raum-zeitlichen Verhaltens und zur Kalibrierung der Latenzzeit

Das **Time-referenced 4D test and Calibration System (Ti4CalibS)** wurde am GIK entwickelt (Depenthal, 2009), um Latenzzeiten zwischen den einzelnen Messelementen eines Koordinatentripels (z. B. Richtung, Vertikalwinkel, Distanz) zu bestimmen, die eine gemeinsame 3D-Koordinate für die Position eines bewegten Objektes beschreiben. Zusätzlich sind natürlich die Verzögerungen zwischen Abfragezeitpunkt und Messzeitpunkt bzw. zwischen Messzeitpunkt und Erhalt der Messdaten von Bedeutung, denn diese Intervalle können in Abhängigkeit vom verwendeten Betriebssystem eine nicht zu vernachlässigende Größenordnung annehmen. **Ti4CalibS** besteht aus einem zeitreferenzierten Dreharm von etwa 1 m Länge, dessen Winkelstellung zeitreferenziert von einem Encoder erfasst wird, sodass eine raum-zeitliche Sollkoordinate (4D) vorliegt. Der Dreharm kann mit horizontaler und vertikaler Drehachse betrieben werden, so dass die Latenzzeit zwischen jeweils zwei Komponenten des polaren

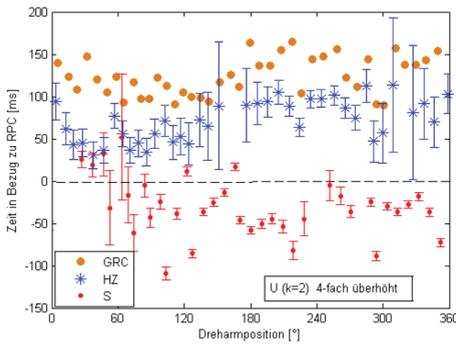


Abb. 121: Verzögerungszeiten der Horizontalrichtungen- und Distanzmessung sowie des Ausgabezeitpunktes (GRC=Zeitpunkt des Eintreffens des Messergebnisses) eines TCRA in Bezug zum Abfragezeitpunkt RPC.

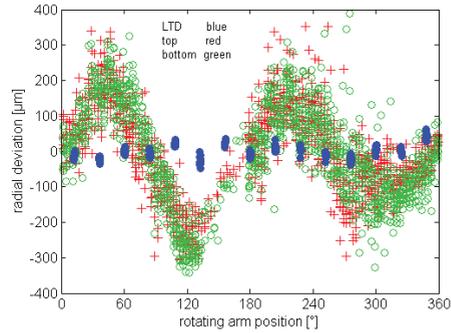


Abb. 122: Radiale Abweichungen der beiden iGPS-Sensoren (grün und rot) sowie des Lasertracker-Prismas (blau) von der idealen Kreisbahn.

Koordinatentripels ohne Korrelation zur dritten Komponente untersucht werden kann. Die räumliche Messunsicherheit ist jeweils kleiner als 20 µm. Abbildung 119 zeigt den Dreharm in Schrägstellung, die Steuerelektronik ist nicht im Bild.

Das Ergebnis der Untersuchung von Robottachymetern war, dass die Verzögerungszeiten der untersuchten Geräte nicht systematisch und damit auch nicht kalibrierbar waren (vgl. Abb. 121). Andererseits konnte aufgrund von Analysen mit Ti4CalibS der Hersteller des iGPS nicht nur die raum-zeitliche Leistungsfähigkeit sowie raum-zeitliche Offsets feststellen, sondern auch die Leistungsfähigkeit des iGPS optimieren. Depenthal (2010a,b, 2012). Abbildung 122 zeigt die radialen Abweichungen von der Kreisbahn (Tangentialgeschwindigkeit etwa 2 m/s) vor der Modifizierung (rote und grüne Signatur). Für die Prüfung des Lasertrackers werden zwar die Systemgrenzen von Ti4CalibS erreicht (blaue Signatur), wie in Juretzko (2007), vor allem in Ulrich (2016) dargelegt und in Abbildung 122 ersichtlich, allerdings zeigt sich eine hohe Reproduzierbarkeit der Trajektorie für die 13 Runden.

3.5 Ballbar – Prüfmittel zur Kalibrierung von Lasertrackern

Lasertracker müssen als polare Messsysteme nicht nur allen herkömmlichen Justierbedingungen klassischer Tachymeter genügen, sondern auch zusätzlichen, die die Strahlage und -führung (von Interferometer und ADM) beschreiben. Abhängig von der Bauart sind bis zu 16 Parameter zu bestimmen. Hierbei werden sowohl übliche Verfahren wie Messung in zwei Lagen verwendet als auch Messungen in Verbindung mit speziellen Testvorrichtungen. Hierzu

zählt die so genannte Ballbar, ein rotierender Arm, der den Reflektor auf einem Kreis mit einem Durchmesser von etwa 1 m führt (siehe Abb. 120). Insbesondere die Rundheit und Planarität des realisierten Kreises müssen im μm -Bereich garantiert werden (gefordert sind $5\ \mu\text{m}$ als radiale Abweichung bzw. $10\ \mu\text{m}$ als planare Abweichung), da sie unmittelbar auf die Kalibrierqualität wirken. Am GIK wurde eine solche Ballbar neu konzipiert und gefertigt. Sie liefert eine radiale Abweichung (Rundheit) von besser $2,2\ \mu\text{m}$ und eine planare Abweichung von besser $1\ \mu\text{m}$. Da diese Ergebnisse mit dem Lasertracker erzielt wurden, sind dessen Unsicherheitsbeiträge ebenfalls enthalten. Messungen mit einem Messtaster an der Achse selbst lieferten eine Genauigkeit für die Lagerung von besser $1\ \mu\text{m}$. Damit ist sie der Leica Ballbar qualitativ überlegen und führte mit A-TOM (siehe Abb. 80 auf Seite 180) zu einem Low-cost-System zur 6DOF-Bestimmung.

3.6 Testnetze und k-VLT

Im Hinblick auf die erforderliche Genauigkeit in der LVM ist die dauerhafte Installation von Testnetzen und Bereitstellung von Sollkoordinaten fragwürdig, da dies einen unvermeidbar hohen Aufwand erfordern würde, um die gewünschte Stabilität zu erzielen. Da die Stabilitätsansprüche für kurze Messphasen weniger herausfordernd sind, wird am GIK der Gedanke der Simultankalibrierung (vgl. Abschnitt 2.2) verfolgt, wobei sowohl die Netzkoordinaten als auch die zu bestimmenden Kalibrierparameter gemeinsam bestimmt werden. Diese Herangehensweise erfordert die Abstimmung der Netzkonfiguration auf die jeweilige Kalibrieraufgabe, und zwar so, dass alle Parameter möglichst unkorreliert bestimmt werden können. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde ein Algorithmus entwickelt, der bei vorgegebenem CAD der räumlichen Situation (incl. Möblierung und unzugänglicher Bereiche) für ein definiertes Kalibriermodell (beispielsweise der Kalibrierparametersatz eines Lasertrackers) die optimale Punktverteilung berechnet (Faller, 2012). Diese Vorgehensweise ist in industriellen Arbeitsumgebungen hervorragend geeignet, um Lasertracker zu rekalisieren, ohne sie dem jeweils laufenden Fertigungsprozess entziehen zu müssen.

Eng damit verknüpft ist der Algorithmus des so genannten Virtuellen Laser Trackers (VLT), der die zu erwartende Messunsicherheit im Objekt aufgrund der beim Messprozess auftretenden Unsicherheiten, vor allem der Standardabweichung der Kalibrierparameter, berechnet. Diese Idee wurde am GIK übernommen und hinsichtlich auftretender Latenzzeiten zwischen der Ermittlung der einzelnen Komponenten der polaren Messwerte zum kinematischen VLT (k-VLT) erweitert. Damit ist es nun möglich, die raum-zeitliche Messunsicherheit einer mit einem Lasertracker bestimmten Bahnkurve zu ermitteln.

3.7 Reflektorprüfeinrichtung – Exzentrizitätsbestimmung

Für Lasertracker werden diverse Kugelreflektoren angeboten, nämlich CCRs (Corner-Cube-Reflectors), also Open-Air-Reflektoren, und Glasprisma-Reflektoren, sowie CatEyes und n2-Reflektoren. Diese unterscheiden sich infolge ihres mechanischen Aufbaus, im maximalen Arbeitsbereich und in der Gewährleistung der beiden Bedingungen, dass jeder einfallende Strahl (a) parallel zum ausfallenden sein soll und (b) unabhängig vom Einfallswinkel gleichlange optische Wege zurücklegt. Um die Abtastung von Oberflächen im μm -Bereich zu ermöglichen, sind diese Reflektoren in hochpräzise Kugelschalen aus Stahl gefasst (Naab, 2016). Für den n2-Reflektor, dessen hochempfindliches Glasmaterial eine besondere Herausforderung darstellt, wurde eine solche Fassung von der mechanischen Werkstatt des GIK entwickelt, die nun dem Hersteller als eine konstruktive Lösung zur Verfügung steht, die den hohen Anforderungen der LVM genügt (vgl. Bernhart und Hennes, 2012). Auch andere Hersteller bieten Eigenanfertigungen von Kugelreflektoren für den Einsatz mit Präzisions-tachymetern an, die in unserem Kalibrierlabor einen Abnahmetest erhalten. Zur Entwicklung dieses Tests wurde die Additionskonstante mit diversen Methoden unterschiedlicher Güte bestimmt. Bei Verwendung von einem Lasertracker wichen die Ergebnisse weniger als 0,1 mm voneinander ab, bei Verwendung eines Präzisionstachymeters streuten sie in einem Intervall von 0,2 mm. Damit ist auch für den geforderten Anwendungsbereich die Belastbarkeit des Massentests sichergestellt sowie eine Aussage über die Wiederholgenauigkeit des Präzisions-tachymeters ableitbar. Die detaillierte Diskussion dieser Ergebnisse ist als Publikation in Vorbereitung.

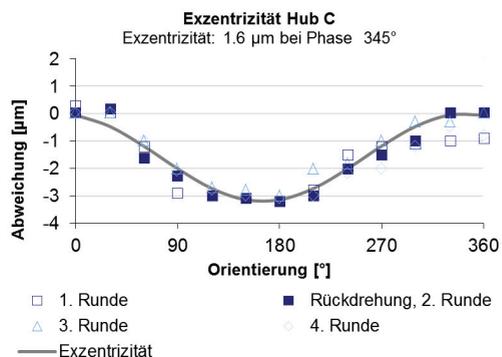
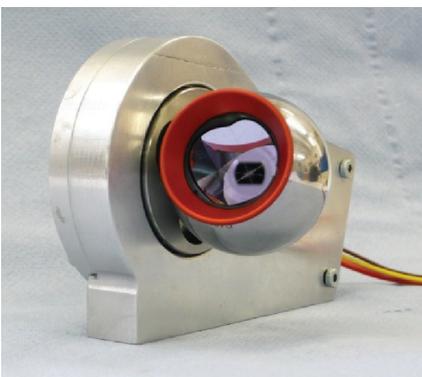


Abb. 123: Active Hub: Funktionsmuster (links), Zentrierhaltigkeit exemplarisch mit CCR 2414 (rechts).

Da 360°-Prismen bekanntlich ausrichtungsabhängige Additionskorrekturen aufweisen (Favre und Hennes, 2000), wird auch deren Bestimmung laufend in Bezug auf aktuelle Reflektormodelle weiterverfolgt. Powalka (2018) konnte experimentell die Abhängigkeit von dem jeweils verwendeten Zielerfassungsmodul nachweisen, womit auch hier die Notwendigkeit zur Systemkalibrierung (Hennes und Ingensand, 2000) offenkundig wird.

Zur hochgenauen Zielpunktfestlegung wurde deswegen am GIK ein drehbarer Adapter für CCR entwickelt, der eine Zentrierhaltigkeit von wenigen μm garantiert (vgl. Abb. 123). Die Orientierung kann mittels einfacher Befehle an den integrierten Motor eingestellt werden (daher die Bezeichnung "active hub"), sodass auch aus unterschiedlichen Anzielerhaltungen ohne manuellen Eingriff hochpräzise Distanzmessungen zu einem ausgerichteten Reflektor vorgenommen werden können.

3.8 Winkelprüfeinrichtung – halbautomatisierte Vollkreiskalibrierung

Die Kalibrierung von Winkelencodern erfolgt am GIK nicht durch Rückführung, sondern über die geometrische Restriktion der Winkelsumme im Vollkreis. Hierfür entwickelte Depenthal (2006) das bekannte Rosettenverfahren weiter, sodass nun mit einem 12-seitigen Spiegelpolygon mit einem halbautomatisierten Messverfahren Aussagen über kurzperiodische Richtungsabweichungen möglich sind. Dabei ist der Prüfling (hier ein Drehtisch) unter dem Spiegelpolygon montiert (vgl. Abb. 124 links). Durch mehrere Messreihen mit jeweils veränderter relativer Orientierung können sowohl die unbekanntes Winkel zwischen den Spiegeln als auch periodische Abweichungen des zu kalibrierenden Encoders bestimmt werden. Das

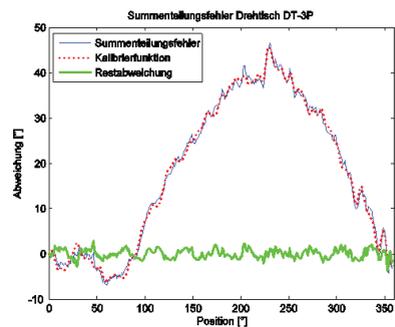


Abb. 124: Kalibrierung von Richtungsencodern: links: Versuchsaufbau mit Spiegelpolygon, rechts: Kalibrierergebnis.

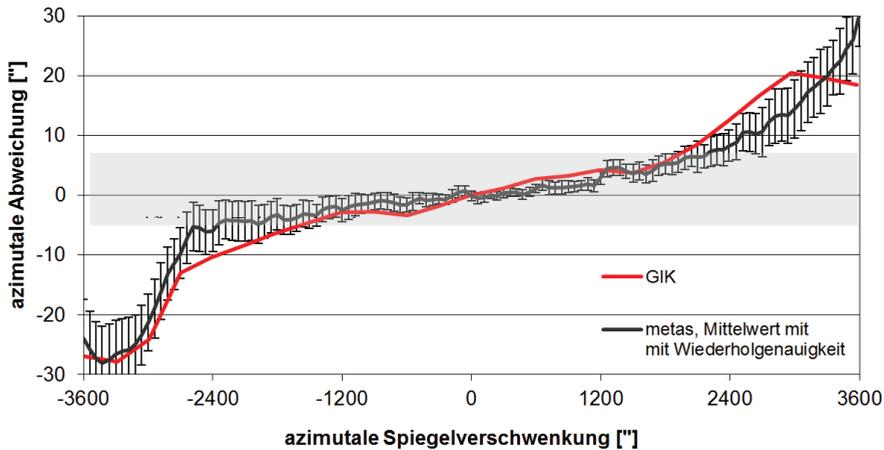


Abb. 125: Überschreiten der spezifizierten Messgenauigkeit (grau), ermittelt durch Prüfungen am GIK (rot) und durch die METAS (Nationales Metrologieinstitut der Schweiz, schwarz mit Angabe der Wiederholgenauigkeit). Verhalten des Prüflings im Arbeitsabstand 300 mm.

Kalibrierergebnis (Abb. 124 rechts) zeigt exemplarisch, dass eine deutliche Reduktion der systematischen Richtungsabweichung (blaue Linie, hier $40''$ (ptp)) durch die mit dem Verfahren ermittelte Kalibrierfunktion (gestrichelt) möglich ist, hier auf etwa ein Zehntel der ursprünglichen Abweichung (vgl. grüne Linie). Da sich das Verhalten des Drehtischs als reproduzierbar erwies, kann mit diesem Verfahren die Qualität von derartigen Drehtischen bzw. ihren Richtungsencodern erheblich gesteigert werden.

Bestandteil dieser Einrichtung ist ein elektronischer Kollimator des Typs Elcomat mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,25''$ über $1000''$ bzw. $\pm 0,1''$ über $20''$. Dieser wird außerdem sowohl zur Ausrichtung von Komponenten als auch zur Instrumentenprüfung verwendet, beispielsweise, um Interpolationsabweichungen von Richtungsmesssystemen (oder allgemein Richtungsencodern) zu bestimmen. Diese können laut Herstelleraussagen heute durchaus die langperiodischen Richtungsfehler übertreffen, was dieser Untersuchung eine gewisse Bedeutung zuweist, da die klassische Reduktionsstrategie der mechanischen Teilkreisverstellung in modernen Instrumenten nicht mehr möglich ist.⁴

Im Vergleich zum Elcomat besticht der elektronische Autokollimator Theta Scan T40 der Firma Micro-Radian durch eine deutlich kompaktere Bauweise und eine höhere Abtastrate. Letztere macht ihn für kinematische Messvorgänge attraktiv. Er wurde am GIK untersucht,

⁴ Aus dem Kontext der Spezifikation ist Winkelmessgenauigkeit (1σ) gemeint.

da seine Spezifikation eine dem Elcomat ähnliche Messgenauigkeit suggeriert. Im Datenblatt des Vertriebspartners heißt es lediglich: "The ThetaScan T40 dual-axis digital autocollimator resolves to 0,1 arc sec over a range of $\pm 1^\circ$ (Optoiq, 2010)". Diese Aussage erfordert eine kritische Betrachtung, da diese Angabe lediglich bedeutet, dass der kleinste angezeigte Messschritt 0,1'' beträgt. Im Prüfzertifikat des Herstellers wird eine Winkelmessgenauigkeit eines Winkels mit 7.2'' angegeben, die über einen Messbereich von 3600'' für einen (Standard-) Arbeitsabstand von 300 mm gilt. Diese Genauigkeit wurde in den Spezifikationen des untersuchten Exemplars sogar für Arbeitsabstände bis zu 1 m garantiert. Tatsächlich konnte jedoch am Rand des Messbereichs ein deutliches Überschreiten der Spezifikation (vgl. Abb. 125) festgestellt werden, das für größere Arbeitsabstände deutlich zunimmt. Der Hersteller begründet seine zu optimistische Genauigkeitsangabe auf das Prüfverfahren des NIST (National Institute of Standards, USA), bei dem nur ein einzelner (vergleichsweise kleiner) Referenzwinkel an wenigen ausgesuchten Positionen des Messbereichs überprüft wird, wobei das Aneinanderketten von kleinen Prüfwinkeln (nach NIST) zur Unaufdeckbarkeit von systematisch wirkenden Abweichungen im Gesamtmessbereich führt. Der Nutzer kann also die erreichbare Messqualität nur vollständig bewerten, wenn er auch den Kalibrierprozess kritisch prüft: die am GIK und bei der METAS verwendeten Prüfverfahren weisen diesen Mangel nicht auf und liefern aussagekräftigere Ergebnisse.

3.9 Maßverkörperungen und weitere Prüfhilfsmittel

Für die Überprüfung von Messgeräten sieht die VDI/VDE 2634 (VDI/VDE, 2002, 2012) den Einsatz von Maßverkörperungen vor (vgl. auch DIN EN ISO 25178-70, 2014). Maßverkörperungen sind darauf optimiert, die "Kooperation" mit der zu prüfenden Größe und/oder dem zu prüfenden Messmittel in optimaler Weise zu gewährleisten. Für jede Art von Messsystem, das mit einem Messmittel zur taktilen Antastung ausgestattet ist (Koordinatenmessgerät, Messarm, Lasertracker), sind als Maßverkörperungen Kugeln bzw. Stäbe mit Kugelaufnahmen geeignet, Rückführungen durchzuführen. Kugeln ermöglichen grundsätzlich auch die Nutzung für Scanner. Mit Kugeln sind Antastgenauigkeiten bestimmbar; gekoppelt mit Referenzmaßstäben sind Längen überprüfbar.

Die Kugelaufnahmen am Stab erlauben auch die Aufnahme von CCRs und damit prinzipiell die Längenprüfung eines Lasertrackers. Der Tetronom-Kugelstab des GIK (vgl. Abb. 126) besitzt eine Länge von 1000 mm mit einer Längenunsicherheit ($k=2$) von $1,8 \mu\text{m}$ bezogen auf den Kugelmittelpunkt, die Kugeln selbst weisen eine Unsicherheit ($k=2$) im Durchmesser von etwa $0,2 \mu\text{m}$ und in der Rundheit von $0,1 \mu\text{m}$ auf. Der Stab besteht aus CFK mit einem

Ausdehnungskoeffizienten von $-0,2\text{ppm/K}$ (also deutlich geringer als das typischerweise in Basislatten verwendete Invar) und besitzt patentierte, selbstkompensierende Köpfe. Diese Maßverkörperung gestattet prinzipiell ebenfalls eine unkomplizierte Prüfung beider Winkelmesseinrichtungen von Lasertrackern und über die Anmessung der Kugeln auch die von Laserscannern (incl. Laserradar). Damit ist die kritische Größe der Winkelmessung definiert rückführbar und eine wesentliche Forderung des Maschinenbaus erfüllt.

Des Weiteren verfügt das GIK über einen 87-teiligen Satz an Mitutoyo Parallelendmaßen zwischen 0,5 mm und 100 mm, der mit sub- μm -Genauigkeit kalibriert ist. Hiermit können beispielsweise Messschieber und Messschrauben kalibriert werden. Hinzu kommen Kugel- und Kegelnormale sowie Referenzebenen vor allem für optisches Scannen, die auch teilweise als Referenz für taktiles Messen dienen. Ergänzt wird dies durch mehrere portable Granittische, teils mit T-Nut, die eine Ebenheit von wenigen Mikrometern aufweisen.

Qualitätsmerkmale taktil messender Systeme sind unter anderem die Antastabweichung, die Reproduzierbarkeit aus verschiedenen Antastrichtungen sowie die volumetrischen Abweichungen (also Längenabweichungen im gesamten Messvolumen in Bezug auf Referenzlängen), deren Bestimmung in Regelwerken beschrieben wird, z. B. für Messarme in ASME B 89.4.22 (ASME, 2004), verschiedene Blätter der VDI/VDE 2617 (VDI/VDE, 2002, 2012), sowie in der DIN EN ISO 10360-12 (2018). Als Referenz dienen Präzisionskugeln, die in Dreipunktlagerungen gehalten werden. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden derartige Dreipunktauflagen

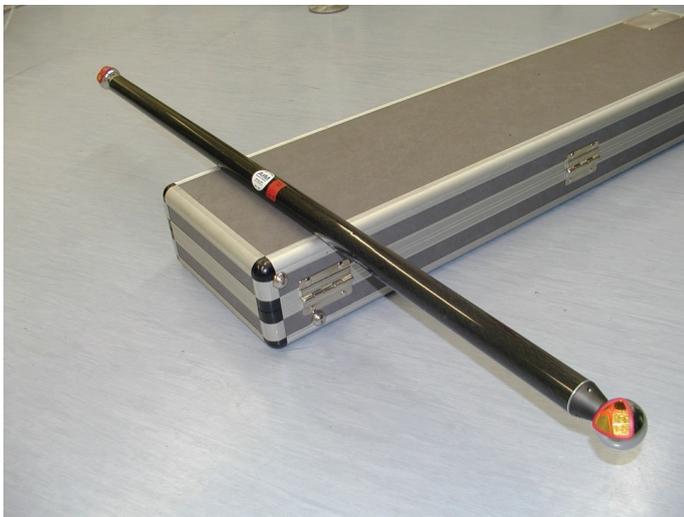


Abb. 126: Tetronomstab mit zwei CCRs.

(Nester) (vgl. Abb. 127 rechts) mit Unterstützung der Werkstatt des GIK entwickelt und gefertigt (vgl. Abb. 127 links) Hierbei mussten Abriebeigenschaften, Materialelastizitäten von Stahl und Klebstoffen, magnetische Eigenschaften der Haltemagnete, thermisches Verhalten und weitere Parameter berücksichtigt werden, um eine mechanische Reproduzierbarkeit des Referenzpunktes (je nach Exemplar zwischen $2\ \mu\text{m}$ und $20\ \mu\text{m}$ zu erreichen (vgl. Mann, 2015).

Mit dem optischen Tisch, der als Sonderanfertigung hergestellt wurde, verfügt das Kalibrierlabor des GIK über eine geeignet stabile, d. h. nicht-deformierbare und maximal gedämpfte Arbeitsunterlage mit den Abmessungen von $1000\ \text{mm} \times 1600\ \text{mm}$ und dem Gewicht von $300\ \text{kg}$. Sie besitzt flächig ein Montageraster aus Gewindebohrungen mit dem Abstand von $20\ \text{mm}$, welche das Aufspannen von Versuchsaufbauten sowie das gleichzeitige Montieren eines Messsystems (z. B. Messarm) erlaubt (einheitliches Dämpfungs-/ Bewegungsverhalten). Innerhalb dieses Bohrrasters wird eine Ebenheit von kleiner $100\ \mu\text{m}$ eingehalten. Durch den Verzicht auf ein Isolationssystem wird die Relativbewegung zwischen optischem Tisch und Boden des Kalibrierlabors vermieden, sodass Messungen z. B. mit einem frei im Raum stehenden Lasertracker ermöglicht werden.

Mithilfe des selbstkonzipierten Spannsystems können sowohl kleine, als auch große und sperrige Objekte stabil auf dem optischen Tisch aufgespannt werden, sodass die Auswirkung der Antastkraft bei taktilen Messungen (z. B. bei Lasertracker- oder Messarm-Messungen) minimiert wird. Bei der optischen Antastung von Objekten werden aufgrund der Spezialbeschichtungen der Tischoberfläche und der Spannelemente störende Reflexionen deutlich reduziert. Weiterhin ist der optische Tisch so ausgeführt, dass beispielsweise selbst starke

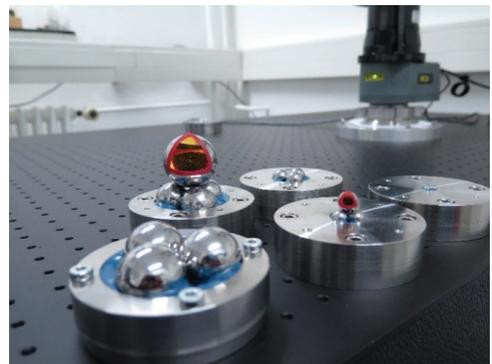


Abb. 127: Studentin (S. Mann) bei der Fertigung von Komponenten der Dreipunktaufgabe in der Werkstatt des GIK (links) und Dreipunktaufbauten mit CCR als Testkörper (rechts).

Temperaturschwankungen oder die Montage von Messsystemen bzw. das Aufspannen von schweren Objekten zu einer minimalen Durchbiegung (thermisch, statisch, dynamisch) führt bzw. das geforderte Dämpfungsverhalten erhalten bleibt.

4 Fazit und Ausblick

Aufgrund des hohen Anspruchs an heutige Kalibriereinrichtungen könnte ein Laboratorium nur mit hohem Aufwand die Kalibrierung *aller* in der Geodäsie geforderten dimensionellen Größen anbieten. Daher koordiniert die GKGM die Schwerpunktbildung an den europäischen Institutionen. Am GIK wird den beiden Paradigmenwechseln hin zu geforderter Rückführung und kinematischer Vermessung gefolgt. Der Fokus liegt auf Kalibrier- und Prüfanordnungen für den Bereich der LVM sowie für kinematische Anwendungen. Für beide Bereiche besitzt das Prüflabor des GIK Alleinstellungsmerkmale.

Wenn kein übergeordnetes Normal vorliegt (oder nicht realisiert werden kann), darf die Rückführung durch einen Ringversuch ersetzt werden. Ein solcher Ringversuch wurde bei der Einrichtung der 1 km langen Distanz-Vergleichsstrecke der Universität der Bundeswehr durchgeführt, woran sich das GIK mit seinen beiden Lasertrackern und seinem mobilen Temperaturmesssystem beteiligte. Nicht ohne Stolz ist zu bemerken, dass die Messergebnisse des GIK für fast alle Teilstrecken (bei Distanzen bis über 500 m) dem jeweiligen Mittelwert aus allen Messungen der neun teilnehmenden Institutionen am nächsten kamen und dabei die größte Abweichung der am GIK erhaltenen Messwerte zum Mittelwert aus der Gesamtausgleichung $30\ \mu\text{m}$ beträgt. Weitere Details sind in (Herrmann u. a., 2012) beschrieben. Dies kann nur erreicht werden, wenn alle auftretenden Störeinflüsse sorgsam eliminiert werden und die Messanordnung als Systemkalibrierung verstanden wird, die neben den Längenmesssystemen auch die Systeme zur Erfassung der (vorwiegend meteorologischen) Korrekturparameter kalibriertechnisch beherrscht. Wie auch die erfolgreiche Installation der Nivelliersystemkalibrierung an der TU Graz zeigt, sind Kalibriertechniken zielführend, wenn sie auf das gesamte Equipment abgestimmt sind, was eine Fallentscheidung in Bezug auf Komponenten- bzw. Systemkalibrierung erfordert. Daher bleibt zur Qualitätssicherung (vgl. z. B. Hennes, 2010, und andere Beiträge in dem zitierten Tagungsband) die Messmitteluntersuchung und -kalibrierung ein zentrales Thema und damit auch Aufgabengebiet von Hochschulinstitutionen, um effiziente Herangehensweisen wissenschaftlich zu evaluieren. Dies allein ist jedoch nicht zielführend, denn nur mit Unterstützung einer mechanischen Werkstatt und eines Elektroniklabors, die die

Bedürfnisse der Vermessungstechnik bzw. der LVM kennen und zu berücksichtigen wissen, sind die Prüf- und Kalibrieranlagen zielführend zu errichten.

Literatur

- ASME (2004): Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. B89.4.22, American Society of Mechanical Engineers, New York. 54 S.
- Bernhart, F. und Hennes, M. (2012): Leistungsfähigkeit eines "Reflektor 160" in Kombination mit einem Lasertracker. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012(2):63–69.
- BIPM (2012): Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. Joint Committee for Guides in Metrology. 57 S.
- Brinkmann, B. (2012): Internationales Wörterbuch der Metrologie. 4., überarbeitete Auflage, 76 Seiten. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag. 76 S. ISBN: 978-3-410-22472-3.
- Depenthal, C. (2006): Automatisierte Kalibrierung von Richtungsmesssystemen in rotativen Direktantrieben. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2006(8-9):305–309.
- Depenthal, C. (2007): Direktantriebe absolut positioniert – Kalibrierung von rotativen Messsystemen in Direktantrieben. *Antriebstechnik* 2007.
- Depenthal, C. (2009): Entwicklung eines zeitreferenzierten 4-D Kalibriersystems für optisch kinematische Messsysteme. *Veröffentlichungen der DGK, Reihe C*, no. 627. Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: <http://dgk.badw.de/index.php?id=12,%20http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000010086>.
- Depenthal, C. (2010a): iGPS used as kinematic measuring system. FIG, 2010. URL: https://www.gik.kit.edu/downloads/iGPS_FIG2010_Depenthal.pdf (besucht am 06.05.2018).
- Depenthal, C. (2010b): Path Tracking with iGPS. In: Int Conf Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 15-17 Sept. 2010. S. 1–6.
- Depenthal, C. (2012): Die kinematische Leistungsfähigkeit des iGPS. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012:70–72.
- DIN EN ISO 10360-12 (2018): Geometrische Produktspezifikation (GPS). Annahme- und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) – Teil 12: Gelenkarm-Koordinatenmessgeräte (KMG). Deutsche Fassung EN ISO 10360-12:2016. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 13005 (1999): Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. DIN V ENV 13005, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 14253-1 (1999): Geometrische Produktspezifikation (GPS). Prüfung von Werkstücken und Messgräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen. DIN EN ISO 14253-1, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 25178-70 (2014): Geometrische Produktspezifikation (GPS). Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 70: Maßverkörperungen. DIN EN ISO 25178-70:2014-06, Beuth-Verlag, Berlin.
- Faller, S. (2012): Untersuchungen zur Selbstkalibrierung von Lasertrackern mit kardanisch gelagertem Spiegel. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 173 S.
- Favre, C. und Hennes, M. (2000): Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 98(2):72–78. URL: www.library.ethz.ch.
- Günther, A. (2009): Eigenschaften der Linearmessbahn im kinematischen Betrieb. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 145 S.
- Hennes, M. (2007a): Flächenerfassung mit Lasertrackern als Alternative zu scannenden Verfahren. In: 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag, Berufliche Weiterbildung (BWB) Industriemesstechnik, TU Dresden, Geodätisches Institut, 01.06.2007. S. 59–65.
- Hennes, M. (2007b): Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 114(4):136–146.
- Hennes, M. (2010): Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik. In: Beiträge zum 93. DVW-Seminar: Qualitätsmanagement Geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, vol. 61. 10./11. Juni 2010, Hannover. S. 239–252.

- Hennes, M. (2013): Zum Umgang mit Unsicherheiten bei geodätischen Mess- und Auswertverfahren. In: Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswertverfahren, vol. 71. Beiträge zum 125. DVW-Seminar, 24./25.6.2013, Hannover. Wissner-Verlag, S. 25–46. ISBN: 978-3-89639-917-5.
- Hennes, M. (2016): Messmittel der Large Volume Metrology (LVM). In: *Handbuch der Geodäsie: 5 Bände*. Hrsg. von W. Freeden und R. Rummel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–24. ISBN: 978-3-662-46900-2. DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2_26-1. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2_26-1.
- Hennes, M. und Heister, H. (2007): Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(11-12):375–383.
- Hennes, M. und Ingensand, H. (2000): Komponentenkalisierung versus Systemkalisierung. In: Schnädelbach, K., und Schilcher, M. (Hrsg.) Beitrag zu XIII Kurs für Ingenieurvermessung: Ingenieurvermessung 2000, 13.-17.3.2000, München. Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 166–177.
- Herrmann, C., Liebl, W. und Neumann, I. (2012): Lasertrackermessungen des KIT Karlsruhe und der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken der Kalibrierbasis der UniBw München. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 119(8-9):309–313.
- Herrmann, C. (2016): Entwicklung eines trackingfähigen optischen Messsystems zur Posenbestimmung. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KITopen. 174 S. DOI: 10.5445/IR/1000063757.
- ISO 17123 (2001): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. DIN ISO 17123, Beuth-Verlag, Berlin.
- Juretzko, M. (2007): Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmeßsystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500. In: Brunner, F. K. (Hrsg.) Beitrag zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs: Ingenieurvermessung 07, 17.-20.04.2007, Graz. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 181–186.
- Juretzko, M. (2013): Überprüfungsstrategien für Tachymeter. In: Beitrag zum 125. DVW-Seminar "Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswertverfahren", vol. 71. 24.-25. Juni 2013, Hannover. Schriftenreihe des DVW, S. 47–63.
- Mann, S. (2015): Entwicklung eines Prüfhilfsmittels für Messarme mit kombinierter Antastung. Masterarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 173 S.
- Naab, C. (2010): Eigenschaften des Laser Radars. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 100 S.
- Naab, C. (2016): Beiträge zur Optimierung der Offsetkorrektur bei der taktilen Erfassung von Freiformflächen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KITopen. 190 S. DOI: 10.5445/IR/1000071109.
- Optoiq (2010): LaserFocusWorld. URL: <http://www.optoiq.com/index/photronics-technologies-applications/lfw-display/lfw-article-display/38867/articles/laser-focus-world/volume-35/issue-9/products/optolink-offers-information-faster.html> (besucht am 07.07.2018).
- Powalka, S. (2018): Untersuchung zur Interaktion unterschiedlicher Zielerfassungssysteme von Totalstationen und verschiedenen 360°-Reflektortypen. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT.
- Richter, E. und Juretzko, M. (2007): Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(6):212–223.
- Ulrich, T. (2012): Uncertainty Estimation for Kinematic Laser Tracker Measurements. In: Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sydney/Australien, 13.-15.11.2012. (reviewed IEEE Xplore).
- Ulrich, T. (2016): Uncertainty Modelling of High-precision Trajectories for Industrial Real-time Measurement Applications. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*. Dissertation. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), KIT Scientific Publishing, 81 S. DOI: 10.5445/IR/1000060440.
- VDI/VDE (2002): VDI / VDE 2634 Blatt 1: 2002-05: Optische 3D-Messsysteme. Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung. URL: www.beuth.de (besucht am 07.07.2018).
- VDI/VDE (2012): VDI / VDE 2634 Blatt 2: 2012-08: Optische 3D-Messsysteme. Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. URL: www.beuth.de (besucht am 07.07.2018).
- Vennegeerts, H., Richter, E., Paffenholz, J. A., Kutterer, H. und Hennes, M. (2010): Genauigkeitsuntersuchungen zum kinematischen Einsatz terrestrischer Laserscanner. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2010.

Das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach (BFO)

**BFO-Team: Peter Duffner¹, Thomas Forbriger², Bernhard Heck¹,
Malte Westerhaus¹, Rudolf Widmer-Schnidrig³ und Walter Zürn**

¹ Geodätisches Institut (GIK), Institut für Technologie Karlsruhe (KIT)

² Geophysikalisches Institut (GPI), Institut für Technologie Karlsruhe (KIT)

³ Institut für Geophysik, Universität Stuttgart

1 Das Observatorium

Das geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach, auch bekannt als Black Forest Observatory (BFO), ist eine Forschungseinrichtung des Karlsruher Instituts für Technologie und der Universität Stuttgart und wird von den Geodätischen und Geophysikalischen Instituten beider Universitäten betrieben (siehe Abb. 128). Es wurde in den Jahren 1970 bis 1972 in der Nähe von Schiltach/Schwarzwald eingerichtet und befindet sich in der stillgelegten Grube St. Anton im Heubach, in der zwischen 1770 und 1850 Silber und Kobalt abgebaut wurde.

Initiator dieses interuniversitären Projektes war Prof. Stephan Müller, der 1964 als erster Lehrstuhlinhaber des neu geschaffenen Geophysikalischen Instituts (GPI) nach Karlsruhe berufen worden war. Nach der Abberufung von Prof. Müller an die ETH Zürich im Jahr 1970 übernahm Dr. Hermann Mälzer vom Geodätischen Institut (GIK) die Fortführung der Arbeiten zum Aufbau und 1971 die Leitung des Observatoriums. Nach der Versetzung von Prof. Mälzer in den Ruhestand ging die Leitung des Observatoriums 1988 an Prof. Hans-Georg Wenzel über. 1999 übernahm Prof. Bernhard Heck; im Oktober 2018 ist die Leitungsfunktion an seinen Nachfolger Prof. Hansjörg Kutterer übergegangen.



Abb. 128: Blick auf das Laborhaus des BFO mit dem Eingang zum Stollen. Foto: Irina Westermann, KIT.

Der Auf- und Ausbau des Observatoriums inklusive der Absicherung und Erweiterung der bestehenden Stollenanlage (vgl. Abb. 129) sowie die Errichtung von Laborhaus und erdmagnetischer Hütte wurden von der Stiftung Volkswagenwerk finanziert. Spätere bauliche Maßnahmen wurden vom Universitätsbauamt Karlsruhe übernommen. Zur instrumentellen Ausstattung hat neben den beteiligten Universitäten und Instituten die Deutsche Forschungsgemeinschaft wesentlich beigetragen. Das Observatorium mit den geographischen Koordinaten 48.3301°N , 8.3295°E ist mit Bedacht im zentralen Bereich des Schwarzwaldes fernab von anthropogenen Rauschquellen wie Industrie und Verkehr angelegt worden. Die Messinstrumente im Innern des ehemaligen Silberbergwerks sind umgeben von solidem Gestein des

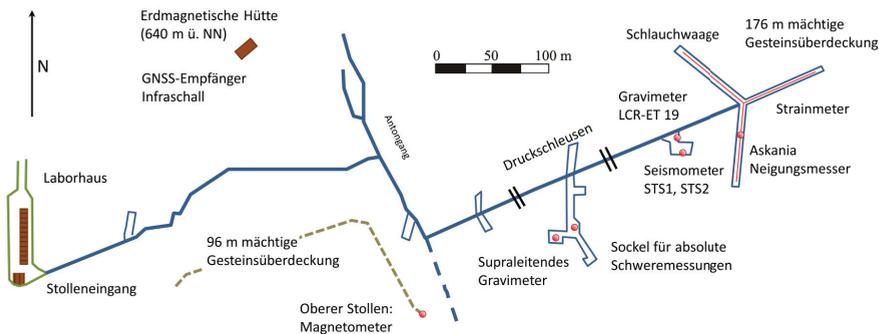


Abb. 129: Stollenplan des BFO in der Grube Anton mit den Standorten der wichtigsten Messgeräte.

Nordausläufers der Triberger Granitmasse und befinden sich in Tiefen von bis zu 170 m unter der Erdoberfläche sowie in einer Entfernung von bis zu 700 m vom Eingang des Stollens. Dies schafft thermisch sehr stabile Messbedingungen. Zu den Besonderheiten, die das BFO gegenüber anderen geodynamischen Observatorien und seismologischen Stationen auszeichnen, gehören zwei dicht am Fels abschließende Druckschleusen. Sie bieten Schutz gegenüber direkten Luftdruckeinflüssen auf die Instrumente und tragen entscheidend zur thermischen Stabilität bei. Wegen dieser günstigen Messbedingungen und der hochpräzisen Messinstrumente, die am BFO betrieben werden, ist das Observatorium international bekannt als eine der rauschärmsten Stationen der globalen seismologischen Netzwerke. Insbesondere im langperiodischen Bereich (Perioden zwischen einer Stunde und 100 Sekunden) setzt das BFO internationale Standards für seismologische Messungen wie z. B. die freien Eigenschwingungen der Erde.

Die Arbeits- und Forschungsschwerpunkte am BFO lassen sich in drei Bereiche gliedern:

- a) kontinuierliche Erfassung und Publikation von Deformationen des Erdkörpers sowie zeitlicher Änderungen des Erdschwere- und Erdmagnetfeldes in einem sehr breiten Frequenzbereich;
- b) Bereitstellung eines international einzigartigen Umfelds zum Test von geodynamischen Messgeräten;
- c) Analyse von freien und erzwungenen Schwingungen des Erdkörpers zur Verbesserung der Kenntnis des strukturellen Aufbaus des Erdkörpers und der Interaktionen im System Erde.

Aufbauend auf dem Bericht von Mälzer und Wenzel (1993) anlässlich der 125-Jahr-Feier des GIK sollen im Folgenden die Maßnahmen zur kontinuierlichen Fortführung des Observatoriumsbetriebs, aktuelle Forschungsergebnisse sowie die Einbindung des BFO in den Lehrbetrieb des KIT vorgestellt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den vergangenen 25 Jahren mit kurzen Rückblicken auf die Gründungszeit sowie einem Ausblick in die Zukunft.

2 Umbrüche

Prof. Bernhard Heck übernahm die Leitung des BFO in einer Zeit der Umbrüche, die den Betrieb des Observatoriums in der bisherigen Form mehr als einmal gefährdeten. Dem unermüdlichen Einsatz und dem Geschick von Bernhard Heck, in Verbindung mit der fortgesetzten Unterstützung durch die ehemalige Universität Karlsruhe (TH), das KIT und die Universität Stuttgart, ist es zu verdanken, dass der Betrieb des Observatoriums kontinuierlich

mit gleichbleibend hohen Ansprüchen an die Qualität der Daten und Analysen fortgesetzt werden konnte.

Dies betraf in erster Linie die wissenschaftlichen und technischen Stellen mit Arbeitsplatz in Schiltach. 1999 ging mit Walter Grossmann einer der beiden Techniker in den Ruhestand. Seine Stelle wurde seitens des GPI in anderen Bereichen eingesetzt und stand für das BFO nicht mehr zur Verfügung. Die zweite Technikerstelle konnte nach dem Ausscheiden von Heinz Otto im Jahre 2005 auf Grund des seit 1996 geltenden Solidarpaktes zur Hochschulfinanzierung und -steuerung in Baden-Württemberg nicht sofort neu besetzt werden. Im Rahmen von intensiven Verhandlungen mit den Leitungen der Universitäten Karlsruhe (TH) und Stuttgart konnte eine Lösung gefunden werden, an der sich beide Einrichtungen finanziell beteiligen. Damit waren die Grundlagen für den Weiterbetrieb des Observatoriums in der bisherigen Form gewährleistet. Im Februar 2006 wurde Peter Duffner eingestellt, der seitdem die vielfältigen mechanischen und elektrotechnischen Aufgaben am BFO durchführt. Den Hausmeister- und Putzdienst am Observatorium übernehmen seit Beginn der 1970er Jahre Mitglieder der benachbart wohnenden Familie Hauer.

Auch die Neubesetzung der beiden Wissenschaftlerstellen am BFO verlief nicht völlig problemlos. Es bestand ein erhöhter Druck, Arbeitsplätze aus Schiltach an die einstellenden Institute zu verlagern und das BFO verstärkt über Fernwartung zu betreuen. Diese Diskussion wurde letztendlich durch eine Entscheidung des Rektors der Universität Karlsruhe (TH), Prof. Horst Hippler, mit dem Hinweis auf die beträchtlichen Auswirkungen auf die Datenqualität des Observatoriums beendet. Im Herbst 2000 wurde Dr. Rudolf Widmer-Schmidrig am Geophysikalischen Institut der Universität Stuttgart als Nachfolger von Dr. Dieter Emter eingestellt, 2003 folgte Dr. Thomas Forbriger vom Geophysikalischen Institut des KIT als Nachfolger von Dr. Walter Zürn. Der Arbeitsplatz der beiden Wissenschaftler ist weiterhin am Observatorium, allerdings müssen sie im Vergleich zur Periode ab 1970 deutlich mehr Aufgaben an ihren Heimatinstitutionen übernehmen, was zu einer nicht unerheblichen Doppelbelastung führt.

Nach der Wegberufung von Prof. Hans-Georg Wenzel im Jahre 1999 an die Universität Hannover wurde diese Professorenstelle im Rahmen des Solidarpaktes nicht wiederbesetzt; der hiermit verbundene Aufgabenbereich wurde dem Lehrstuhl von Prof. Bernhard Heck zugeschlagen. Als Ausgleich wurde eine neue Wissenschaftlerstelle geschaffen, auf der im Herbst 1999 Dr. Malte Westerhaus eingestellt wurde. Er übernimmt am GIK seitdem als "rechte Hand" von Prof. Heck Aufgaben im Bereich des administrativen Betriebs des BFO. Unterstützt wurde und wird er dabei von den Lehrstuhl-Sekretärinnen Christel Hahn (bis 2001), Diana Bracko (bis 2013) und Martina Pfersching (ab 2014). Auch an den tragenden Institutionen

fand zu Beginn des Jahrtausends ein Generationenwechsel statt. Die derzeitigen Direktoren Prof. Nico Sneeuw (Geodätisches Institut Stuttgart), Prof. Manfred Joswig (Geophysikalisches Institut Stuttgart) und Prof. Andreas Rietbrock (Geophysikalisches Institut Karlsruhe) stehen wie ihre Vorgänger hinter dem BFO und unterstützen den Betrieb in vielfältiger Weise.

Als ein ständiger äußerer Bedrohungsherd, der mittel- und unmittelbar den Weiterbetrieb des Observatoriums gefährdete, erwies sich in den letzten beiden Dekaden der Ausbau der Windenergie. Vibrationen durch Luftverwirbelung zwischen Rotorblättern und Mast, Eigenschwingungen der Anlage sowie Drehmomente auf Grund von Laständerungen koppeln in den Untergrund ein und breiten sich in Form elastischer Wellen aus. Windkraftanlagen (WKA) tragen damit in bestimmten Frequenzbereichen zu einer Erhöhung des Grundrauschens bei. Die konkreten Auswirkungen waren zu Beginn der 2000er Jahre noch weitgehend unerforscht. Inzwischen sind sie für eine Reihe von seismologischen Breitbandstationen, verschiedene Stationsgeometrien und -geologien sowie unterschiedliche Wetterlagen quantitativ nachgewiesen worden (z. B. Stammer und Ceranna, 2016). Die Stärke der Beeinflussung hängt dabei wesentlich von der relativen Lage zwischen WKA und Station, der Topographie, dem Aufbau und den elastischen Eigenschaften des Untergrundes sowie dem Frequenzband ab, in dem die Beobachtungen durchgeführt werden. Vorhersagen dazu sind außerordentlich schwierig, konkrete Aussagen sind erst nach Installation einer WKA in Stationsnähe möglich.

Diese Situation erschwerte die Verhandlungen zur Vermeidung der Auswirkungen von WKA auf das Observatorium Schiltach. Auf der anderen Seite war auch die Anzahl möglicher Investoren in der Nachbarschaft des BFO nicht im Vorhinein bekannt. Es war also ein Kompromiss zu finden, der den potentiellen Interessen beider Seiten Genüge tat. Nach mehreren Verhandlungsrunden mit den beteiligten Ministerien in Baden-Württemberg, lokalen Behörden und der Fürstlich-Fürstenbergischen Forstverwaltung (FFF) als Vertreter des Besitzers des BFO-Stollens einigte man sich schließlich auf einen Schutzradius von 5 km um das Observatorium. Darüber hinaus wurde eine Pachtzahlung vereinbart, die vom KIT unter Beteiligung der Universität Stuttgart getragen wird. Die Verträge mit der FFF sind auf 50 Jahre angelegt, sodass der Weiterbestand des BFO langfristig gesichert ist.

Inzwischen sind einige WKA in Entfernungen > 6 km zum BFO errichtet worden, eine weitere direkt am Rand der Schutzzone ist im Stadium der fortgeschrittenen Planung. Der Abstand scheint ausreichend groß zu sein, sodass bisher keine signifikanten Auswirkungen auf die langperiodische Seismologie als zentrales Forschungsgebiet am BFO erkannt wurden. Allerdings ist eine Beeinträchtigung der vom Landeserdbendienst Baden-Württemberg

genutzten kurzperiodischen Signalanteile nicht ausgeschlossen. Quantitative Untersuchungen zu den potentiellen Störungen sind derzeit im Gange.

3 Instrumentarium

Das Supraleitende Doppelkugelgravimeter GWR SG-056 (Abb. 130) stellt die bedeutendste Erweiterung des Instrumentariums im Messstollen des BFO während der vergangenen 25 Jahre dar. Es wurde 2009 über das Programm für Forschungsgrößgeräte der DFG unter Beteiligung des Landes Baden-Württemberg über die Universitäten Karlsruhe (TH) und Stuttgart beschafft und in einer geschützten Kammer in der ehemaligen Pendelkammer des Observatoriums installiert (Abb. 131). Die Funktionsweise dieses Schweresensors basiert auf dem Prinzip der magnetischen Levitation. Zwei supraleitende Hohlkugeln aus Niob werden in einem durch supraleitende Spulen aufrechterhaltenen, extrem konstanten Magnetfeld zum Schweben gebracht. Durch Schwereänderungen und Trägheitskräfte hervorgerufene Änderungen in den vertikalen Positionen der Kugeln werden über ein Feedback-System erfasst und kompensiert. Die dazu notwendigen elektrischen Ströme sind proportional zur Beschleunigungsänderung und stellen das Messsignal dar.



Abb. 130: Das SG-056 mit der Steuerungs- und Registrierungselektronik. Alle Sensoren im Stollen sind über Lichtleiterkabel mit dem Laborhaus verbunden. Nur spezielle Arbeiten werden direkt an den Sensoren durchgeführt (Thomas Forbriger, vorn, und Peter Duffner). Foto: Markus Breig, KIT.



Abb. 131: Das Supraleitende Gravimeter SG-056 ist in einer speziellen Schutzkammer im BFO-Stollen untergebracht. Der zur Heliumverflüssigung notwendige Kompressor befindet sich in einer benachbarten Felskammer. Foto: Markus Breig, KIT.

Die Schweresensoren werden mittels einer Kühlung durch flüssiges Helium bei einer Temperatur von -269°C betrieben. Der große Vorteil eines Supraleitenden Gravimeters gegenüber herkömmlichen Federgravimetern ist die Langzeitstabilität des tragenden Magnetfeldes. Dadurch wird es möglich, langperiodische Erdgezeiten und Schwereänderungen auf Grund von Rotationeigenschwingungen der Erde im Periodenbereich von Monaten bis Jahren zu messen. Das SG-056 wird am BFO aber nicht allein als reiner Schweresensor, sondern als breitbandiger seismologischer Beschleunigungssensor betrieben. Rudolf Widmer-Schnidrig (2003) konnte nachweisen, dass Supraleitende Gravimeter im Frequenzbereich unterhalb von $0,001\text{ mHz}$ den dedizierten Breitbandseismometern überlegen sind und dadurch neue Einblicke auch im Frequenzband der Erdeigenschwingungen ermöglichen. Das SG-056 am BFO ist weltweit das erste Doppelkugelinstrument mit zwei gleich großen, aber verschiedenen schweren Niob-Kugeln. Die obere Kugel besitzt die übliche Masse von $4,34\text{ g}$, die untere Kugel hat eine ca. viermal so große Masse von $17,7\text{ g}$. Dadurch erhoffte man sich einen Beitrag zu der Frage, ob die mit



Abb. 132: Peter Duffner bei der Installation der permanenten GNSS-Antenne. Im Hintergrund befindet sich die Messhütte, in der sich u. a. Instrumente zur regelmäßigen Messung der Orientierung des Erdmagnetfeldes befinden.

der Erhöhung der Masse einhergehende Verringerung des thermisch verursachten Rauschens zu einer messbaren Verbesserung der Signalqualität führen würde. Eine Untersuchung von Rosat und Hinderer (2011) scheint diese Annahme zu bestätigen. Danach ist der untere Sensor des SG-056 der am wenigsten gestörte Sensor im globalen Netzwerk der Supraleitenden Gravimeter. Durch fortgesetzte Arbeiten zur Kalibrierung und zum besseren Verständnis der Eigenschaften des Instruments und seiner elektronischen Komponenten soll die Genauigkeit der Schweremessungen mit dem SG-056 weiter erhöht werden (Forbriger und Heck, 2018).

Die Installation des SG-056 wurde durch weitere Maßnahmen flankiert. Um zwischen langperiodischen Schwereänderungen und möglichen tektonisch bedingten Höhenänderungen der Region unterscheiden zu können, wurde neben der außerhalb des Stollens gelegenen Messhütte des BFO eine kontinuierlich registrierende GNSS-Station errichtet (Abb. 132). 2017 wurden die Antenne und der GNSS-Empfänger durch das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg erneuert und die Station als eine von drei Monitoringstationen in das *SAPoS*[®]-Netzwerk des Landes übernommen.

Die ehemalige Pendelkammer mit dem SG-056 befindet sich hinter der ursprünglichen Druckschleuse des BFO-Stollens. Um die übrigen Sensoren von den unumgänglichen Installationsarbeiten am SG und thermischen Emissionen des Kompressors zur Heliumverflüssigung abzuschirmen wurde eine zweite Druckschleuse im Stollen hinter der Kammer eingebaut. Beide Schleusen wirken als einfache Tiefpassfilter für Luftdruck- und Temperaturvariationen mit Zeitkonstanten von ca. 40 Stunden und tragen erheblich zu der rauscharmen Messumgebung am BFO bei. Hinter der zweiten Schleuse arbeiten derzeit die folgenden Messgeräte:

- ein LaCoste-Romberg Erdgezeiten-Gravimeter ET-19 mit elektrostatischem Feedback (LCR ET-19)
- drei Streckeisen STS-1 Breitbandseismometer (Ost-, Nord- und Vertikalkomponente)
- ein Streckeisen STS-2 Drei-Komponenten-Breitbandseismometer
- ein ASKANIA Zwei-Komponenten-Vertikalpendel mit modernisierter Elektronik
- drei 10 m lange Invardraht-Strainmeter (Typ Cambridge) in den Azimuten N2°O, N60°O, und N300°O
- eine 111 m lange Schlauchwaage (Typ Horsfall) im Azimut N331°O.

Weitere instrumentelle Erneuerungen und Verbesserungen betrafen die magnetischen Sensoren. Im Jahre 2000 wurde entschieden, die magnetischen Messgeräte aus der Messhütte in den oberen Stollen der Grube Anton zu verlegen, um den Einfluss von Temperaturschwankungen zu reduzieren. In den folgenden Jahren wurden dort ein Overhauser Protonenmagnetometer

GSM-90 sowie ein 3-Komponenten FGE Fluxgate Magnetometer des dänischen meteorologischen Institutes (DMI) installiert (Widmer-Schnidrig u. a., 2018). Lediglich die regelmäßigen Messungen zur Orientierung des Magnetfeldes finden weiter in der Messhütte statt. Diese Maßnahmen trugen zu einer erheblichen Verbesserung der Datenqualität bei, und 2006 erhielt das BFO den Status eines offiziellen magnetischen Observatoriums im INTERMAGNET-Netzwerk.

Komplettiert wird das Instrumentarium am BFO durch diverse meteorologische Sensoren. Alle am BFO erfassten Daten werden in Nahe-Echtzeit durch internationale Datenzentren publiziert: Data Management Center der Incorporated Research Institution for Seismology (IRIS DMC) an der Universität Washington in Seattle, Seismologisches Zentralobservatorium (SZO) an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover, INTERMAGNET in Edinburgh, GNSS Datenzentrum am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt sowie dem Informationssystem und Datenzentrum (IGETS-ISDC) am GeoForschungsZentrum Potsdam. Die Daten stehen kostenfrei für die Nutzung durch Wissenschaftler und Öffentlichkeit zur Verfügung.

4 Aktuelle Forschung

Die kontinuierliche Erfassung der Beobachtungsgrößen mit möglichst hohem Signal-Rausch-Abstand ist die Grundaufgabe am BFO. Dieser Auftrag erfordert eine ständige technische Wartung der Sensoren und der Infrastruktur am BFO durch die vor Ort arbeitenden Mitarbeiter. Datenmonitore ermöglichen die tägliche optische Kontrolle der Messdaten, bei Störungen werden unverzüglich Gegenmaßnahmen ergriffen. Darüber hinaus tragen die eigenen Forschungsarbeiten der Mitarbeiter mit den BFO-Daten erheblich zur Datenqualität bei, da auf diese Weise auch kleinste technische Unregelmäßigkeiten frühzeitig erkannt werden.

Eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Datenqualität am BFO sind spezielle Experimente und Forschungsarbeiten zu den Ursachen des seismischen Rauschens. Eine der wichtigsten natürlichen Störquellen sind Luftdruckvariationen. Sie übertragen sich mittels gravimetrischer Attraktion und Bodendeformationen auf die Beschleunigungs- und Deformationssensoren und limitieren die technisch erreichbare Sensitivität der Messinstrumente. Die intensive Beschäftigung mit diesem Phänomen seit Beginn der 1980er Jahre führten zu einem besseren Verständnis dieser Effekte und zur Entwicklung von Korrekturansätzen sowohl für Vertikal- als auch Horizontalkomponenten (Müller und Zürn, 1983; Zürn und Widmer, 1995; Zürn und Wielandt, 2007; Zürn u. a., 2007). Thomas Forbriger analysierte

magnetische Störungen in den Daten der Breitbandseismometer. Er konnte nachweisen, dass sich Variationen des Magnetfeldes direkt in scheinbare Beschleunigungen der Sensormasse übertragen (Forbriger, 2007; Forbriger u. a., 2010). Sofern die magnetische Sensitivität individuell für jedes Beobachtungsinstrument bestimmt ist, können die Störungen mittels paralleler Magnetfeldregistrierungen deutlich reduziert werden. Die am BFO abgeleiteten Korrekturansätze kommen nicht nur den eigenen Instrumenten, sondern allen Stationen der nationalen und internationalen seismischen Netzwerke zu Gute.

Aufbauend auf der Datenqualität leistet das BFO international anerkannte Forschungsbeiträge auf den Gebieten der Erdzeitenforschung und der langperiodischen Seismologie. Als das BFO 1972 seine Arbeit aufnahm, stand die hochpräzise Erfassung und Bestimmung von Amplituden und Phasen der Erdzeitsignale in Schwere-, Neigungs- und Dehnungsregistrierungen im Fokus. Aus den Resultaten sollten Love'sche Zahlen berechnet und mit entsprechenden Ergebnissen der bei sehr viel höheren Frequenzen abgeleiteten seismologischen Erdmodelle verglichen werden. Es war jedoch von Beginn an klar, dass zusätzliche Signale wie Ozeanauflasten, lokale Verzerrungen des Deformationsfeldes sowie die zum Teil nur unzureichend genau bekannten in-situ Kalibrierfaktoren dieses Unterfangen erheblich erschweren würden.

Während der ersten zwei Dekaden am BFO wurden verschiedene Schlüsselexperimente zur Validierung der lokalen Störungen des Gezeitendeformationsfeldes durch Hohlräume, Topographie und geologische Inhomogenitäten durchgeführt (siehe Zürn, 2014). Neigungs- und Strainmeter unterschiedlicher Bauart wurden an verschiedenen Stellen des Stollensystems betrieben und die lokalen elastischen Effekte präzise beschrieben (Emter und Zürn, 1985). Begleitet wurden die Messungen durch 2D-Finite-Elemente-Modellierungen. Durch diese international beachtete Testserie konnte die Existenz dieser Effekte eindeutig nachgewiesen und quantifiziert werden.

Ende der 1980er Jahre trat die Erdzeitenforschung am BFO etwas weiter in den Hintergrund, da es zu jener Zeit nicht möglich war, ozeanische Auflasten und lokale elastische Effekte ausreichend genau zu modellieren. Eine Ausnahme bildeten Untersuchungen zur Erdkernresonanz, die im ganztägigen Gezeitenband zu veränderten Amplituden und Phasen einiger Partialtiden führt. Die aus Gezeitenmessungen berechneten Eigenperioden dieser Rotationseigenschwingung der Erde wichen von den Ergebnissen theoretischer Erdmodelle ab, was u. a. durch eine um 300 - 600 m erhöhte Elliptizität der Kern-Mantelgrenze erklärt werden konnte (Neuberg u. a., 1990).

Dank der erweiterten Möglichkeiten der Messtechnik und vor allem der immensen Steigerung der numerischen Modellierungskapazitäten konnte die Gezeitenforschung am BFO in den letzten Jahren wieder intensiviert werden. Sogenannte "gleitende", d. h. zeitsensitive Erdgezeitenanalysen der Registrierungen von Supraleitenden Gravimetern am BFO und anderer im globalen geodynamischen Netzwerk (GGP) vereinigten Observatorien deckten scheinbare zeitliche Veränderungen der Erdgezeitenamplituden im Promille-Bereich sowie Phasenänderungen von wenigen Zehntelgrad auf. Sofern man annimmt, dass sich die Übertragungseigenschaften der Erde auf einer Zeitskala von Jahrzehnten nicht verändert haben, können diese zeitlichen Variationen der Erdgezeitenparameter im Wesentlichen erklärt werden durch

- Zusatzsignale, die im Modell des anregenden Gezeitenpotentials nicht enthalten sind, z. B. nichtlineare Ozeangezeiten, Modulation der Ozeangezeiten durch veränderlichen Wasserstand oder Strahlungszeiten (Temperatur, Luftdruck)
- Fehler im mathematischen Analysemodell, z. B. eine unzureichende Modellierung der Resonanzeigenschaften der Erde oder eine unzureichende Trennung verschiedener Einflussgrößen.

Vor dem Hintergrund dieser Beobachtungen läuft derzeit ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Forschungsprojekt am BFO mit zwei Doktorandenstellen (Eva Schroth, GIK und Adam Ciesielski, GPI). In enger Kooperation mit internationalen Forschergruppen, die sich mit der hydrodynamischen Modellierung der globalen Ozeane befassen, soll der Einfluss der Ozeangezeiten auf die Messungen am BFO und weiteren GGP-Stationen im Detail studiert werden. Ozeanmodelle der neuesten Generation sagen u. a. jährliche Variationen der halbtägigen Hauptgezeitenwelle voraus, deren Größenordnung, verknüpft mit plausiblen elastischen Übertragungsfunktionen der Erdkruste, die SG-Analyseergebnisse erklären könnten. Die Modelle der verschiedenen Arbeitsgruppen sind hinsichtlich ihrer Wirkung auf die GGP-Stationen aber noch nicht konsistent (siehe Abb. 133). Sollten sich die bisherigen Befunde bestätigen, so könnten global verteilte Supraleitende Gravimeter unter bestimmten Voraussetzungen zur Validierung numerischer Ozeanmodelle herangezogen werden. Dies wäre u. a. auch ein Beitrag zur verbesserten Signaltrennung heutiger und zukünftiger Schwerefeld-Satellitenmissionen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes ist eine Fortentwicklung des mathematischen Erdgezeitenanalyseverfahrens. Damit soll im Wesentlichen eine verbesserte, durch den Nutzer beeinflussbare Trennung verschiedener Anteile in der Reaktion des Systems Erde auf das anregende Gezeitenpotential ermöglicht werden. Damit knüpft das Projekt an die wegweisenden Arbeiten des früheren BFO-Direktors Hans-Georg Wenzel an, der in den 1980er und

1990er Jahren das derzeitige Standardmodell (ETERNA) zur Erdgezeitenanalyse entwickelte (Hartmann und Wenzel, 1995; Wenzel, 1997b,a).

Der zweite Forschungsschwerpunkt am BFO seit Beginn der Messungen in 1972 ist die langperiodische Seismologie, insbesondere das Studium der den Erdkörper umrundenden Oberflächenwellen nach (mittel)-starken Erdbeben sowie die Erdeisenschwingungen. Durch die außerordentlich günstigen Beobachtungsbedingungen im Messstollen des Observatoriums gelangen den Mitarbeitern am BFO dabei einige zu ihrer Zeit weltweit einzigartige Beobachtungen und Interpretationen.

Nach einem schweren Erdbeben im Südpazifik (Macquarie Islands, 23.05.1989, $M=8,2$) konnten Walter Zürn und Rudolf Widmer-Schmidrig erstmals die torsionale Grundmode ${}_0T_2$ nachweisen, bei der sich bildlich gesprochen zwei Hälften der Erdkugel mit einer Periode von 44 Minuten gegeneinander verdrehen (Widmer u. a., 1992). Trotz ihrer geringen Amplitude von unter einem Nanometer pro Meter ließen sich die dabei auftretenden Dehnungen mit den im Stollen installierten Invardraht-Strainmetern signifikant aufzeichnen. Es handelte sich dabei

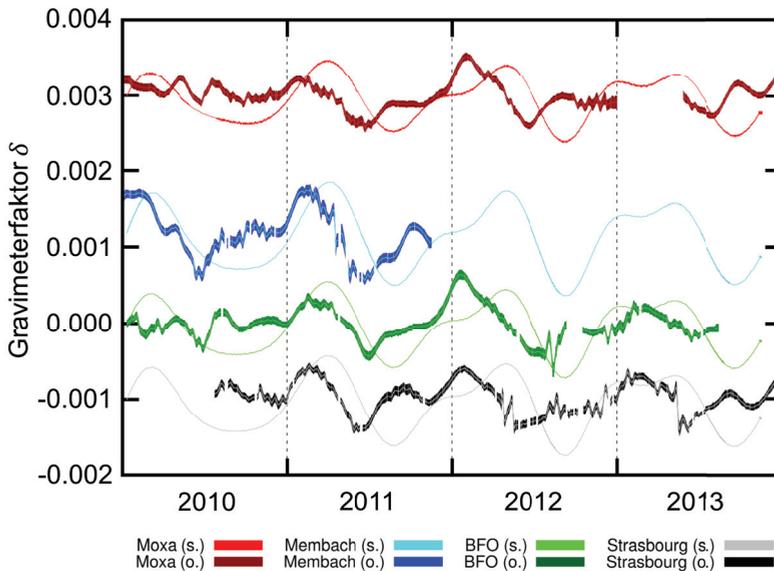


Abb. 133: Variationen der Gezeitenantwortfunktion der Erde für die halbtägige Mondwelle M_2 an vier GGP-Stationen. Die Skala gibt die Veränderungen des Gravimeterfaktors (Verhältnis der beobachteten und der anregenden Gezeitenamplitude) bezüglich eines festen Referenzwertes an. (o) steht für beobachtet, (s) steht für den Schwereeffekt, der durch die nach dem Ozeanmodell "Stormtide" vorhergesagten Massenverlagerungen an den Messstationen erzeugt wird (Schroth u. a., 2016).

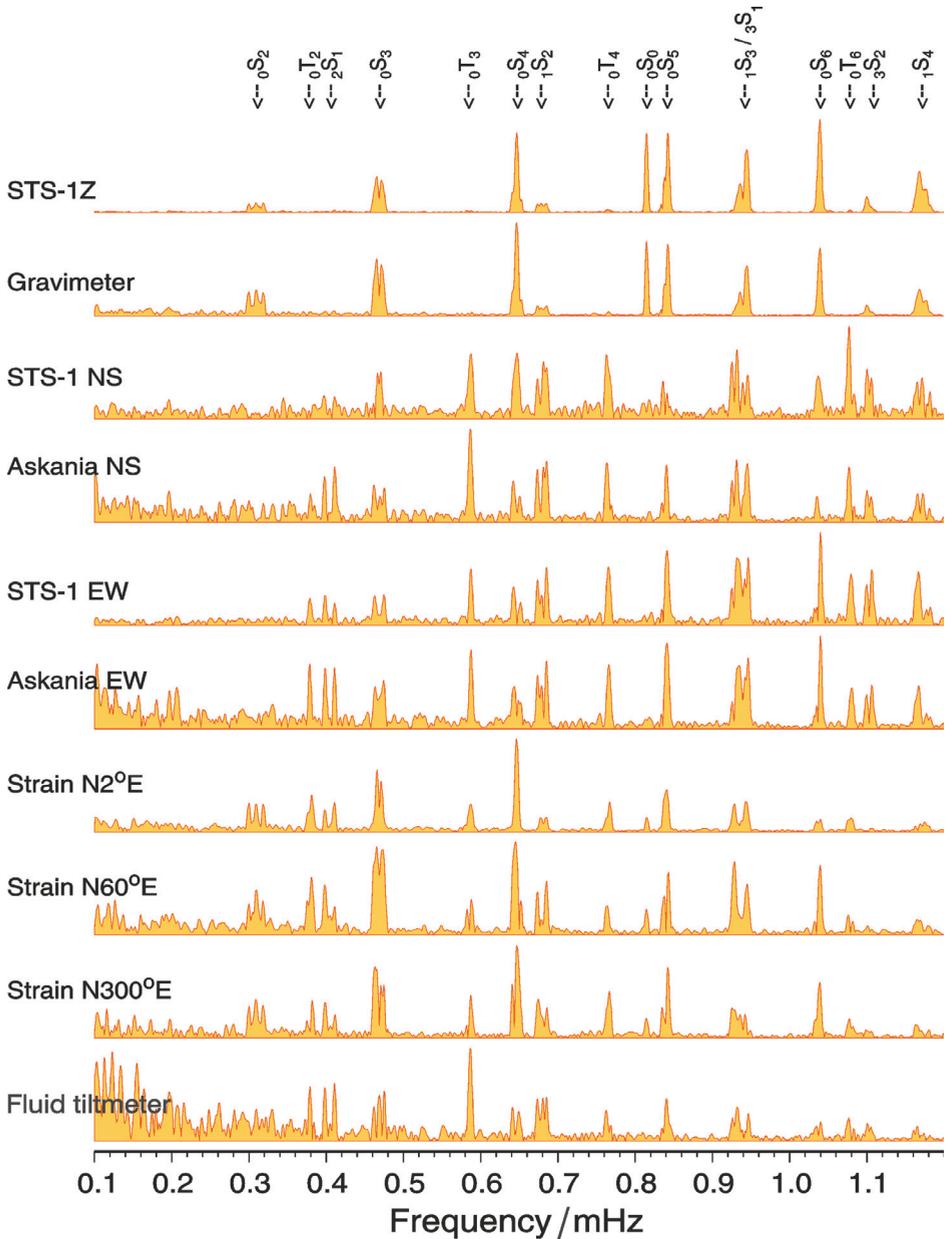


Abb. 134: Spektrum der durch das $M=9,2$ Sumatra-Beben vom 26.12.2004 angeregten Eigenschwingungen der Erde, aufgezeichnet von verschiedenen Breitbandsensoren am BFO (STS-1 Seismometer, LaCoste-Romberg-Gravimeter ET-19, Askania-Vertikalpendel, Strainmeter, Horsfall-Schlauchwaage).

um die erste unzweifelhafte instrumentelle Beobachtung dieser Schwingung. Bis in die 2000er Jahre hinein war das BFO die einzige seismologische Station, an der diese Beobachtung wiederholt gelang. Erst das Sumatra-Beben am 26.12.2004 mit einer Magnitude $M=9,2$ regte die Erdeigenschwingungen zu derart großen Amplituden an, dass eine Registrierung der ${}_0T_2$ -Mode und anderer schwer beobachtbarer Schwingungen an vielen Stationen des globalen seismologischen Netzwerkes möglich war (vgl. Abb. 134).

Die präzise Bestimmung der Eigenschwingungsfrequenzen sowie deren Aufspaltung durch Inhomogenitäten des Erdkörpers ermöglicht die Ableitung verbesserter Strukturmodelle des Erdinneren (Häfner und Widmer-Schmidrig, 2013). Dabei erhöht die große Zahl unabhängiger Messsysteme, mit denen die Erdeigenschwingungen der großen Erdbeben mit sehr gutem Signal-Rauschverhältnis am BFO registriert werden konnten, die Zuverlässigkeit der Analysen und Ergebnisse. Amplituden und Amplitudenverhältnisse der verschiedenen Sensoren werden genutzt, um Störungen durch lokale elastische Strukturen wie Hohlräume oder geologische Inhomogenitäten auch im Eigenschwingungsband zu studieren und zu quantifizieren. Die Redundanz der Messsysteme am BFO ermöglichte u. a. auch den Nachweis der Coriolis-Kopplung der toroidalen Eigenschwingungsmoden (Zürn u. a., 2000).

Während des paroxysmalen Ausbruchs des Pinatubo am 15.06.1991 wurde mit dem Federgravimeter des BFO eine völlig neue Quelle von Erdeigenschwingungen entdeckt (Widmer und Zürn, 1992; Zürn und Widmer, 1996). Resonanzeffekte zwischen der aufsteigenden Eruptionswolke und der darüber liegenden Atmosphäre regten die Erdoberfläche zu Schwingungen in einem sehr engen Frequenzband an. Diese extern angeregten Schwingungen breiten sich wie die Oberflächenwellen (Rayleighwellen) nach einem Erdbeben aus und konnten rund um die Erde registriert werden. Nach dieser Entdeckung wurden drei weitere Vulkaneruptionen (Karakatau 1883, Mount St. Helens 1980, El Chichon 1982) ermittelt, die ähnliche Schwingungen erzeugten.

International einiges Aufsehen erregte die Entdeckung von toroidalen Hintergrundeigenschwingungen der Erde in den EW-Komponenten der Breitbandseismometer STS-1 und STS-2 am BFO (Kurrle und Widmer-Schmidrig, 2008). Es war aus Analysen der seismischen Vertikalkomponenten bereits erkannt, dass die fundamentalen sphäroidalen Moden der Erde im Frequenzbereich zwischen 2 und 7 mHz kontinuierlich angeregt werden. Als mögliche Quellen wurden die Atmosphäre und Schwerewellen in den Ozeanen diskutiert. Nach der Identifizierung der fundamentalen toroidalen Moden in den seismischen Horizontalkomponenten muss jedoch der vermutete Anregungsmechanismus ernsthaft hinterfragt werden; die Diskussion ist derzeit noch nicht abgeschlossen.

5 Akademische Lehre

Die Forschungsaktivitäten der BFO-Mitarbeiter bieten vielfältige Möglichkeiten für Abschlussarbeiten an den mit dem BFO verbundenen Universitätsinstituten. Bisher wurden in über 50 Diplom- und Masterarbeiten und mehr als 10 Dissertationen, unter Betreuung durch BFO-Mitarbeiter, Themen und Problemstellungen des Observatoriums bearbeitet. Dabei wurden Daten der BFO-Sensoren benutzt. Derzeit läuft das oben erwähnte DFG-finanzierte Forschungsprojekt mit zwei Doktorandenstellen am Observatorium. Darüber hinaus fungierten BFO-Wissenschaftler als externe Gutachter und Prüfer für Dissertationen und Habilitationen an den Universitäten Strasbourg, Louvain-la-Neuve, Cambridge, Paris, Utrecht, Chambéry, Jena und Helsinki. Die von den BFO-Wissenschaftlern und den von ihnen betreuten Studierenden an den Universitäten durchgeführten Forschungsarbeiten und den dabei erzielten Forschungsergebnissen sind in ca. 200 Publikationen dokumentiert.

Das BFO ist über Vorlesungs- und Übungsthemen, Exkursionen und ein mehrtägiges Observatoriumspraktikum direkt in die Studiengänge der beteiligten Institute am KIT eingebunden. Bereits im Bachelorstudiengang haben Studierende der Geophysik die Möglichkeit, einen



Abb. 135: Johannes Käufl (links), Masterstudent am GPI, und Thomas Forbriger bei der Installation eines Breitbandseismometers auf dem Testsockel im BFO-Stollen. Foto: Irina Westermann, KIT.

ersten Einblick in die Arbeit an einem seismologischen Observatorium zu bekommen. Im Rahmen der Master-Veranstaltungen "Physics of seismic instruments" am GPI und "Rezente Geodynamik" am GIK wird jedes Jahr eine eintägige Exkursion ans BFO durchgeführt, die den Studierenden die zusätzliche Möglichkeit bietet, theoretische Konzepte der seismologischen Beobachtungstechniken anhand der Implementierung moderner Messinstrumente zu diskutieren. Eine weitere Vertiefung der Inhalte findet seit 2012 im Rahmen des Observatoriumspraktikums (BFO Winter School) statt. Unter der Leitung von Thomas Forbriger befassen sich Studierende des GPI drei Tage lang mit der Installation und Kalibrierung von Breitbandseismometern unter Observatoriumsbedingungen (siehe Abb. 135). Damit bietet das BFO einzigartige Gelegenheiten, theoretische Kenntnisse zu vertiefen und praktische Erfahrungen mit modernsten seismologischen Beobachtungstechniken zu gewinnen.

6 Das BFO als Testeinrichtung

Über die Jahrzehnte seines Bestehens hat sich das BFO einen international anerkannten Status als Testeinrichtung für Breitbandseismometer erarbeitet. Die Voraussetzungen dafür sind die rauscharme Messumgebung, das Vorhandensein von hochpräzisen Vergleichsinstrumenten sowie die ständig vorhandene Unterstützung der Gastexperimente durch die Mitarbeiter vor Ort. Vergleichbare Bedingungen werden nur an sehr wenigen seismologischen Observatorien im globalen Netzwerk vorgefunden.

Ein herausragendes Beispiel für die Nutzung des BFO durch Gastwissenschaftler ist der Test von neuentwickelten Seismometern, die für den Flug zum Mond und zum Mars vorgesehen sind. In den Jahren 2012 und 2017 wurden die Spezifikationen eines sehr breitbandigen (Very Broad Band, VBB) Seismometers, eine Entwicklung von Wissenschaftlern am Institut de Physique du Globe in Paris (IPGP) in Kooperation mit der ETH Zürich und dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, in mehreren Testreihen im Vergleich zu den BFO-Seismometern validiert (vgl. Abbildungen 136 und 137). Das VBB-Seismometer befindet sich derzeit im Rahmen der NASA-Mission INSIGHT auf dem Weg zum Mars. Nach erfolgreicher Landung, voraussichtlich am 26.11.2018, wird es seismische Wellen aufzeichnen und damit wichtige Erkenntnisse über den inneren Aufbau des Planeten liefern. Rudolf Widmer-Schnidrig gehört als Vertretung des BFO zum Science Team der Mission und wird aus erster Hand mit den Daten arbeiten können. Ebenfalls am BFO getestet wurden drei kurzperiodische Seismometer der japanischen Raumfahrtbehörde Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), die im Rahmen der japanischen Mondmission SELENE2 eingesetzt werden sollen.

Weitere Beispiele für die Nutzung des BFO als Testeinrichtung sind:

- 1994 paralleler Betrieb des SG-102 (Leihgabe des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, BKG) und des BFO-Federgravimeters ET-19. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Signal-Rausch-Verhältnis des ET-19 (und der STS-1 Z-Komponente) im Frequenzbereich der Erdeigenschwingungen dem SG-Gravimeter überlegen war. Diese Beobachtung stimulierte den Hersteller, GWR Instruments in San Diego, USA, zu weiteren Verbesserungen der instrumentellen Eigenschaften der SG-Gravimeter.
- Mehrwöchiger Test eines Laser-interferometrischen Seismometers 2000/2001 (Akito Araya, japanische Kollaboration TAMA zur Detektion von Gravitationswellen).
- Langzeittest eines STS-1-Seismometers (iSTS1) mit Laser-interferometrischen Wegaufnehmern (Mark Zumberge, UCSD La Jolla, Californien, USA, seit 2012).
- Wiederholt Testmessungen durch unterschiedliche Herstellerfirmen kommerzieller Breitbandseismometer und Beschleunigungssensoren.
- Vergleichstests von Neigungsmessern kleiner Bauart (Lippmann-Tiltmeter) zur Überwachung des Ringlasers an der geodätischen Fundamentalstation Wettzell.

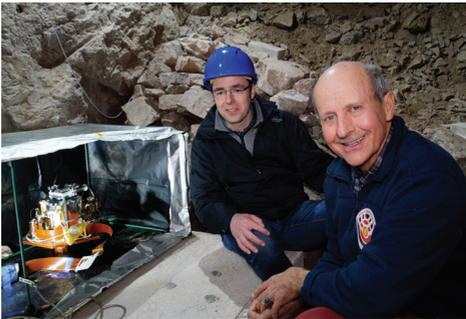


Abb. 136: Rudolf Widmer-Schnidrig und Marco Bierwirth vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS, Göttingen) während der Einrichtung der Testumgebung für das Mars-Seismometer. Foto: Philippe Labrot (IPGP, Paris).

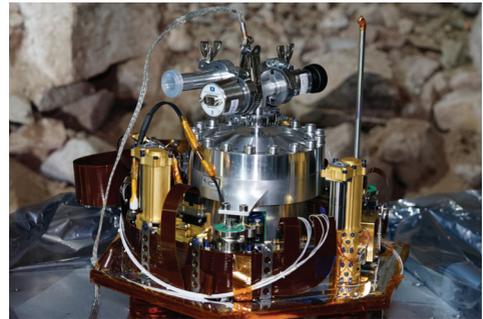


Abb. 137: Blick auf das von einem internationalen Konsortium entwickelte VBB-Seismometer. Ein baugleiches Instrument befindet sich derzeit auf dem Flug zum Mars. Foto: Philippe Labrot (IPGP, Paris).

7 Ausblick

Im Oktober 2018 übernahm Prof. Hansjörg Kutterer als Nachfolger von Prof. Bernhard Heck die Leitung des BFO. Unter seiner Leitung soll die herausragende Stellung des Observatoriums im Globalen Seismologischen Netzwerk (GSN) und in anderen internationalen Netzwerken weiter gestärkt und die Kapazitäten und Angebote im Bereich der Lehre ausgebaut werden. So ist unter anderem die Beschaffung von zwei neuentwickelten langperiodischen Seismometern (STS-6 und Trillium T360) geplant, die für die hochpräzise Erfassung von Erdeigenschwingungen eingesetzt werden sollen. Die derzeit verwendeten STS-1 Seismometer wurden in den 1970er Jahren von der Firma Streckeisen entwickelt und gelten als die besten Breitbandseismometer im GSN, werden aber nicht mehr hergestellt. Mit dem neuentwickelten STS-6 Seismometer möchte die Firma an die Qualität dieser erfolgreichen Linie anknüpfen und gleichzeitig die Handhabung der Geräte verbessern.

Trillium T360 und STS-6 werden als potentielle Nachfolger des STS-1 im GSN diskutiert, bisher wurde jedoch die Qualität der STS-1 Seismometer von diesen Instrumenten noch nicht erreicht. Mit der Beschaffung solcher Geräte wird das BFO von Beginn an in Praxistests und Nutzungsmöglichkeiten involviert sein und könnte, wie im Falle der SG-Gravimeter, durch quantitative Vergleiche und Beschreibung der Geräteeigenschaften eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung der langperiodischen Seismometer spielen. Gleichzeitig würde das BFO, wenn sich die Erwartungen an die Neuentwicklungen erfüllen sollten, frühzeitig von den damit erweiterten Beobachtungsmöglichkeiten profitieren.

Weitere Investitionen dienen der Konsolidierung bzw. weiteren Verbesserung der Einbindung des BFO in nicht-seismische Netzwerke. So soll unter anderem mit der Beschaffung magnetischer Induktionsspulen die Bandbreite der am BFO beobachteten Erdmagnetfeldvariationen erweitert werden. Radar-Corner-Reflektoren zur Unterstützung der SAR-Interferometrie sollen in Verbindung mit der permanenten GNSS-Station die Einbindung des BFO in überregionale geodätische Netze verstärken und die Beobachtungskapazität für tektonische Bewegungen verbessern.

Auch die Lehre soll durch den Einsatz spezieller, moderner Breitbandseismometer inklusive Datenerfassung gestärkt werden. Das Equipment soll Studierenden im Rahmen von Abschlussarbeiten, dem dreitägigen Observatoriumspraktikum (Winter School) oder auch den Lab-Rotations im kommenden Masterstudiengang Remote Sensing and Geoinformation am GIK für längere Zeit zur Verfügung gestellt werden, ohne dafür auf Geräte zurückgreifen zu müssen, die eigentlich für den Observatoriumsbetrieb vorgesehen sind.

Literatur

- Emter, D. und Zürn, W. (1985): Observation of local elastic effects on earth tide tilts and strains. In: *Earth Tides*. Hrsg. von J. C. Harrison. New York: Van Nostrand Reinhold, S. 309–327.
- Forbriger, T. und Heck, A. (2018): Frequency response of the superconducting gravimeter SG056. In: *Festschrift zu Verabschiedung von Prof. B. Heck*. Hrsg. von A. Heck und PSG-Gruppe. Karlsruher Institut für Technologie: Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, S. 57–67. DOI: DOI10.5445/KSP/1000080212.
- Forbriger, T., Widmer-Schmidrig, R., Wielandt, E., Hayman, M. und Ackerley, N. (2010): Magnetic field background variations can limit the resolution of seismic broad-band sensors. *Geophysical Journal International* 183(1):303–312. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04719.x.
- Forbriger, T. (2007): Reducing magnetic field induced noise in broad-band seismic recordings. *Geophysical Journal International* 169(1):240–258.
- Häfner, R. und Widmer-Schmidrig, R. (2013): Signature of 3-D density structure in spectra of the spheroidal free oscillation ${}_0S_2$. *Geophysical Journal International* 192(1):285–294. DOI: 10.1093/gji/ggs013.
- Hartmann, T. und Wenzel, H.-G. (1995): The HW95 tidal potential catalogue. *Geophysical Research Letters* 22(24):3553–3556. DOI: 10.1029/95GL03324.
- Kurrle, D. und Widmer-Schmidrig, R. (2008): The horizontal hum of the Earth: a global background of spheroidal and toroidal modes. *Geophysical Research Letters* 35(6):1–5. DOI: 10.1029/2007GL033125.
- Mälzer, H. und Wenzel, H.-G. (1993): Das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach. In: *Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts*. Universität Fridericiana Karlsruher (TH): Geodätisches Institut, S. 61–64.
- Müller, T. und Zürn, W. (1983): Observation of gravity changes during the passage of cold fronts. *Journal of Geophysics* 53:155–162.
- Neuberg, J., Hinderer, J. und Zürn, W. (1990): On the Complex Eigenfrequency of the Nearly Diurnal Free Wobble and its Geophysical Interpretation. In: *Variations in Earth Rotation*. Hrsg. von D. D. McCarthy und W. E. Carter. American Geophysical Union (AGU), S. 11–16. ISBN: 9781118666531. DOI: 10.1029/GM059p0011.
- Rosat, S. und Hinderer, J. (2011): Noise Levels of Superconducting Gravimeters: Updated Comparison and Time Stability. *Bull. Seism. Soc. Am.* 101(3):1233–1241. DOI: 10.1785/0120100217.
- Schroth, E., Forbriger, F., Westerhaus, M., Müller, M., Mehra, A. und Liu, L. (2016): Investigation of the non-stationary ocean loading with ARTOFS and STORMTIDE ocean models. 18th International Symposium on geodynamics and Earth Tides, Trieste, 5.-9. Juni 2016.
- Stammler, K. und Ceranna, L. (2016): Influence of Wind Turbines on Seismic Records of the Gräfenberg Array. *Seismological Research Letters* 87(5):1075. DOI: 10.1785/0220160049.
- Wenzel, H.-G. (1997a): Analysis of earth tide observations. In: *Tidal Phenomena*. Hrsg. von H. Wilhelm, W. Zürn und H.-G. Wenzel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 59–75. DOI: 10.1007/BFb0011457.
- Wenzel, H.-G. (1997b): Tide-generating potential for the earth. In: *Tidal Phenomena*. Hrsg. von H. Wilhelm, W. Zürn und H.-G. Wenzel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 9–26. DOI: 10.1007/BFb0011455.
- Widmer, R. und Zürn, W. (1992): Bichromatic excitation of long-period Rayleigh and air waves by the Mount Pinatubo and El Chichón volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters* 19(8):765–768. DOI: 10.1029/92GL00685.
- Widmer, R., Zürn, W. und Masters, G. (1992): Observation of low-order toroidal modes from the 1989 Macquarie Rise event. *Geophysical Journal International* 111(2):226–236. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00572.x.
- Widmer-Schmidrig, R. (2003): What Can Superconducting Gravimeters Contribute to Normal-Mode Seismology? *Bulletin of the Seismological Society of America* 93(3):1370–1380. DOI: 10.1785/0120020149.
- Widmer-Schmidrig, R., Duffner, P., Forbriger, T. und Zürn, W. (2018): Observing the Earth's magnetic field in an underground observatory: a case study from BFO. In: *Festschrift zu Verabschiedung von Prof. B. Heck*. Hrsg. von A. Heck und PSG-Gruppe. Karlsruher Institut für Technologie: Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, S. 281–293. DOI: DOI10.5445/KSP/1000080251.
- Zürn, W. (2014): Listening to the Earth. In: Bohlen, T., Bonjer, K.-P., Forbriger, T., Fuchs, K., Gottschämmer, E., Heidbach, O., Hubral, P., Knopf, P., Mann, J., Müller, B., Prodehl, C., Ritter, J., Wenzel, F., Wilhelm, H. und Zürn, W. *50 Years Geophysical Institute Karlsruhe, 1964 to 2014 – Expectations and Surprises*. Hrsg. von C. Prodehl. Karlsruhe, Germany: Geophysical Institute (KIT), Karlsruhe, S. 285–310. DOI: 10.5445/IR/1000043692.
- Zürn, W., Exß, J., Steffen, H., Kroner, C., Jahr, T. und Westerhaus, M. (2007): On reduction of long-period horizontal seismic noise using local barometric pressure. *Geophysical Journal International* 171(2):780–796. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03553.x.

- Zürn, W., Laske, G., Widmer-Schmidrig, R. und Gilbert, F. (2000): Observation of Coriolis coupled modes below 1 mHz. *Geophysical Journal International* 143(1):113–118. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00220.x.
- Zürn, W. und Widmer, R. (1996): World-Wide Observation of Bichromatic Long-Period Rayleigh-waves Excited During the June 15, 1991 Eruption of Mount Pinatubo. In: *Fire and Mud : Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Hrsg. von C. Newhall und R. Punongbayan. Seattle: Philippine Institute of Volcanology, Seismology, Quezon City und University of Washington Press, S. 615–624.
- Zürn, W. und Wielandt, E. (2007): On the minimum of vertical seismic noise near 3 mHz. *Geophysical Journal International* 168(2):647–658. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03189.x.
- Zürn, W. und Widmer, R. (1995): On noise reduction in vertical seismic records below 2 mHz using local barometric pressure. *Geophysical Research Letters* 22(24):3537–3540. DOI: 10.1029/95GL03369.

Die universitäre Geodäsieausbildung in Karlsruhe – Historie, Gegenwart und Zukunft

Michael Illner¹, Michael Mayer² und Martin Breunig¹

¹ Geodätisches Institut (GIK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

² Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, KIT

1 Einleitung

Die Geschichte der geodätischen Hochschulausbildung auf dem Gebiet des Vermessungswesens bzw. der Geodäsie und Geoinformatik in Karlsruhe kann auf eine lange Tradition zurückblicken. In diesem Beitrag wird zunächst ein historischer Abriss über die Entwicklung der universitären Lehre gegeben, bevor dann ausführlich auf den heutigen Stand der Hochschulausbildung und die verschiedenen Kooperationen auf dem Gebiet der Lehre sowie auf neue Ideen und Konzepte für Weiterentwicklungen eingegangen wird. Für eine ausführlichere geschichtliche Darstellung sei auf die Beiträge von Seckel (1993) sowie Heck und Rösch (2009) verwiesen.

2 Die Anfänge der Ausbildung (1807 - 1968)

Der Beginn einer strukturierten Vermessungsausbildung in Karlsruhe reicht bis ins Jahr 1807 zurück, in dem von Johann Gottfried Tulla die strukturell sowie inhaltlich stark an die "École polytechnique" angelehnte Ingenieurschule ins Leben gerufen wurde, die für die Ausbildung von Geometern, Trigonometern sowie Wasser- und Straßenbaumeistern verantwortlich zeichnete. 1828 wurde die Ingenieurschule Teil der 1825 gegründeten Polytechnischen Schule, aus

der die Universität Karlsruhe (TH) entstand. Datum des Beginns der eigentlichen universitären Geodäsieausbildung ist das Jahr 1868, in dem erstmals eine Professur für das Vermessungswesen geschaffen und auf deren Lehrstuhl "Praktische Geometrie und Höhere Geodäsie" Wilhelm Jordan berufen wurde. Im zugehörigen Studienplan waren nahezu doppelt so viele Übungs- wie Vorlesungsstunden integriert – ein deutliches Zeichen für die zunächst sehr praktische Orientierung der Ausbildung. Interessanterweise war damals schon eine zweiwöchige "Große geodätische Excursion" in die Ausbildung integriert, die als Vorgängerin der heute noch stattfindenden Hauptvermessungsübungen angesehen werden kann.

Einen weiteren wichtigen Fortschritt in der universitären Ausbildung stellte die Einführung des sechssemestrigen Diplomstudiengangs im Jahr 1921 dar. Ziel war die Harmonisierung der Vermessungsausbildung mit vergleichbaren Studiengängen an anderen deutschen Hochschulstandorten. Bereits damals wurde Lehrexport in andere Studiengänge geleistet: Bauingenieure, angehende Architekten und Maschinenbauingenieure sowie Lehramtskandidaten der Mathematik besuchten Lehrveranstaltungen aus dem Bereich "Vermessungswesen". Bis 1949 wurden die Studienpläne in unregelmäßigen Abständen novelliert. Die Studiendauer variierte zwischen sechs und acht Semestern mit einer Gesamtanzahl von 211 SWS im Jahr 1949. Das Verhältnis zwischen Vorlesungs- und Übungsstunden lag recht nahe bei eins; getreu dem Leitgedanken, bei einem Ingenieurstudium Theorie und Praxis möglichst ausgewogen zu gewichten.

3 Spezialisierung im Diplomstudiengang Vermessungswesen (1968 - 2008)

Die auch in anderen Studiengängen festzustellenden Spezialisierungen in einzelnen Teilgebieten eines Fachbereiches führte im Diplomstudiengang "Vermessungswesen" 1968 zu der Einführung der zwei Vertiefungsrichtungen "Vertiefung Geodäsie (G-Vertiefer)" und "Vertiefung Vermessungswesen (V-Vertiefer)". Während der Vorlesungsstoff in der Vertiefungsrichtung Geodäsie stärker theoretisch auf mathematisch-physikalische Aspekte ausgerichtet war, betonte der Ausbildungsschwerpunkt in der Vertiefungsrichtung Vermessungswesen die ingenieurwissenschaftlichen und planerischen Aspekte. Die Ausbildung wurde nun im Wesentlichen von zwei Instituten getragen, dem "Geodätischen Institut" mit inzwischen drei Lehrstühlen und dem 1960 neu gegründeten "Institut für Photogrammetrie und Topographie" mit einem Lehrstuhl. Das Maß der Vertiefung betrug ca. 12% des Gesamtstudienumfangs. Beide Vertiefungsrichtungen starteten nach der bestandenen Vordiplomprüfung und führten

zum Abschluss "Diplomingenieur Vermessungswesen". Bereits damals wurde großer Wert darauf gelegt, dass alle Absolventen – sowohl G- als auch V-Vertiefer – die Voraussetzungen für die Zulassung zum "Höheren vermessungstechnischen Verwaltungsdienst" erfüllten.

Im Jahr 1987 wurde der Studienplan erneut modifiziert. Dabei wurde durch Intensivierung der EDV-Ausbildung der zunehmenden Digitalisierung Rechnung getragen und gleichzeitig eine neue Lehrveranstaltung mit der Bezeichnung "Geoinformationssysteme" eingeführt. Ferner wurden die beiden starren Vertiefungsrichtungen zugunsten eines Vertiefungsstudiums mit frei wählbaren Lehrveranstaltungen im Umfang von 30 SWS aufgegeben. Diese weitere Flexibilisierung ermöglichte somit erstmals eine individuelle Ausgestaltung des Studiums.

4 Diplomstudiengang Geodäsie und Geoinformatik (WS 1999/2000)

Insbesondere die zunehmende Automatisierung von Mess- und Rechenabläufen, die Entwicklung und Einführung neuer Beobachtungstechniken (z. B. Verfahren der Satellitengeodäsie) sowie das Erschließen neuer Tätigkeitsfelder in der Geodäsie führten Ende der 1990er-Jahre zu einer weiteren tiefgreifenden Reform in der geodätischen Ausbildung. Zum Wintersemester (WS) 1999/2000 wurde der bisherige Diplomstudiengang "Vermessungswesen" durch den neu konzipierten Diplomstudiengang "Geodäsie und Geoinformatik" abgelöst. Dadurch wurden die Absolventen befähigt, als Experten sowohl für klassische und hochgenaue Vermessungsaufgaben als auch für die Verarbeitung raumbezogener Daten beruflich tätig zu werden. Neben der klassischen Vermessung wurde somit die Geoinformatik als weiteres, stark wachsendes Berufsfeld für die Absolventen erschlossen. Im Studienplan wurde konsequenterweise die (Geo-)Informatik-Ausbildung weiter ausgebaut; u. a. wurden zwei Grundlagenveranstaltungen der Fakultät "Informatik" integriert, die Programmierausbildung intensiviert sowie drei aufeinander aufbauende Lehrveranstaltungen (Geoinformatik I-III) eingeführt. Einer universitären Ausbildung entsprechend stand weiterhin die Aneignung wissenschaftlicher Denk- und Arbeitsmethoden im Vordergrund. Ohne bereits als eigenständige Lehrveranstaltungen ausgewiesen zu sein, wurden die von der Praxis verstärkt nachgefragten überfachlichen Kompetenzen (Schlüsselqualifikationen, Soft Skills) integrativ in bestehenden Lehrveranstaltungen berücksichtigt. Die bewährte Gliederung des Studiums in das viersemestrige Grundstudium, das mit der Vordiplomprüfung abzuschließen war, und das fünfsemestrige Fachstudium wurde bei einer Regelstudienzeit von neun Fachsemestern und einem nach wie vor hohen Praxisanteil beibehalten. Um Freiraum für die neu eingeführten Vorlesungen zu gewinnen, wurde das

Vertiefungsstudium von 30 SWS auf 20 SWS reduziert. Dieser Studiengang war der erste seiner Art im deutschsprachigen Raum und hatte prototypischen Modellcharakter, weshalb er oft als Beispiel bei der Einrichtung entsprechender Studiengänge an anderen Hochschulen diente.

5 Die konsekutiven Bachelor-/Masterstudiengänge Geodäsie und Geoinformatik (ab WS 2008/2009)

Durch die "Gemeinsame Erklärung der Europäischen Bildungsminister zum Europäischen Bildungsraum" vom 19. Juni 1999 in Bologna (Bologna-Deklaration, 1999) wurde in allgemeiner Form die Zielsetzung für die Errichtung des europäischen Hochschulraums und für die Förderung der europäischen Hochschulen weltweit beschlossen. Das Ziel der Bologna-Deklaration bestand insbesondere darin, Bildungsabschlüsse europaweit vergleichbar zu machen und Mobilität von Studierenden durch vereinfachte Anerkennung von im Ausland erbrachten Studienleistungen zu fördern. Diese Erklärung war ursächlich für eine tiefgreifende Umgestaltung der Lehre an deutschen Hochschulen sowie für die Einführung der gestuften Bachelor- und Masterstudiengänge. In den Kultusministerkonferenzen vom 12.06.2003 und vom 09. - 10.10.2003 wurden die Ziele der Bologna-Deklaration konkretisiert. In Deutschland sollte bspw. die Einführung dieser Studiengänge bis zum Jahr 2010 abgeschlossen sein. Die deutschen Universitäten begegneten diesen Vorgaben mit sehr viel Skepsis und sträubten sich lange gegen die Umsetzung, da deutsche Diplomabschlüsse im Ausland umfassend anerkannt waren und hohes Ansehen genossen. Zudem waren Aspekte der Bologna-Deklaration in Diplomstudiengängen bereits umgesetzt (z. B. Förderung der Mobilität von Studierenden durch Vermittlung von Auslandsaufenthalten an Partnerhochschulen, Anerkennung dort erbrachter Studien- und Prüfungsleistungen), und mit den Abschlussdokumenten wurde eine Bescheinigung ausgestellt, mit der die Äquivalenz des akademischen Abschlussgrades "Diplom-Ingenieur/in" mit dem internationalen Grad "Master of Science" bestätigt wurde.

In Baden-Württemberg führte schließlich das am 9. Dezember 2004 vom Landtag beschlossene neue Landeshochschulgesetz zur Auflösung der Diplomstudiengänge sowie deren Überführung in Bachelor-/Masterstudiengänge. Spätestens ab dem WS 2009/2010 wurden in Deutschland keine Studierenden mehr in Diplomstudiengänge aufgenommen. Aufgrund dieser Vorgaben war eine erneute, weitreichende Studienreform nötig, mit der in Karlsruhe schließlich der Systemwechsel vom Diplom- zum konsekutiven Bachelor-/Masterstudiengang "Geodäsie und Geoinformatik" zum WS 2008/2009 vollzogen wurde. Während Zulassungen zum Bachelor-

studiengang nur zum Wintersemester erfolgen, kann das Masterstudium sowohl im Winter- wie im Sommersemester begonnen werden. Formal handelt es sich bei den Bachelor- und Masterstudiengängen um zwei getrennte Studiengänge, zu denen sich die Studieninteressierten jeweils zu bewerben haben.

In den Gremien der damaligen Universität Karlsruhe (TH), die am 1. Oktober 2009 durch den Zusammenschluss mit dem Forschungszentrum Karlsruhe im heutigen Karlsruher Institut für Technologie (KIT) aufging und somit die Aufgaben einer Universität des Landes Baden-Württemberg und einer Forschungseinrichtung der Helmholtz-Gemeinschaft in den drei Säulen Forschung, Lehre und Innovation (KIT, 2018a) vereint, wurde in Übereinstimmung mit den neun führenden Technischen Universitäten (TU9) beschlossen, dass der Masterabschluss der Regelabschluss für ein Ingenieurstudium sein soll. Der Bachelorabschluss ist Voraussetzung für eine Zulassung zum Masterstudiengang und soll den Wechsel in andere Fachrichtungen oder an andere Hochschulstandorte erleichtern. Die Studiendauer für das konsekutive Bachelor- und Masterstudium wurde mit zehn Semestern fest vorgegeben, wobei das Masterstudium selbst vier Semester umfassen sollte. Damit war für das Bachelorstudium ein Studienplan mit einer Regelstudienzeit von sechs Semestern zu konzipieren, das einerseits die für ein wissenschaftliches Studium notwendige Aneignung von Grundlagen in Mathematik, Physik und Informatik zum Ziel hat. Andererseits werden Absolventen auf die spätere Berufswelt vorbereitet, da der Bachelorabschluss gleichzeitig ein berufsqualifizierender Hochschulabschluss ist. Als Maß für die Arbeitsbelastung der Studierenden wurden entsprechend des European Credit Transfer System (ECTS) sogenannte Leistungspunkte (LP) verbindlich eingeführt, wobei einem LP eine zeitliche Belastung von 30 Zeitstunden entspricht. Für ein Semester sind im Mittel 30 LP zu vergeben. Die Lehrinhalte eines Studiengangs werden in übergeordnete Fächer, Module und Lehrveranstaltungen gegliedert, wobei sich ein Modul zeitlich gesehen über max. zwei Semester erstrecken sollte.

5.1 Bachelorstudiengang

Im Bachelorstudium eignen sich Studierende wissenschaftliche Grundlagen und Methodenkompetenzen der Fachwissenschaft "Geodäsie und Geoinformatik" an. Ziel des Studiums ist insbesondere die Ausbildung der Fähigkeit, die erworbenen Qualifikationen berufsfeldbezogen anwenden sowie einen konsekutiven Masterstudiengang erfolgreich absolvieren zu können. Durch frühzeitige Einbeziehung von Lehrbeauftragten aus Praxis und öffentlicher Verwaltung wurde weiterhin sichergestellt, dass der Bachelor-Abschluss gleichzeitig zur Zulassung zum

Vorbereitungsdienst für den "Gehobenen vermessungstechnischen Verwaltungsdienst in der Vermessungsverwaltung" berechtigt.

Die Fächer und Module des Bachelorstudiengangs in seiner ersten Version sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Lehrinhalte folgen einem festen Fächerkanon; lediglich im Modul Schlüsselqualifikationen (5 LP) bestehen Wahlmöglichkeiten. Das Studium zeichnet sich nach wie vor durch einen hohen Praxisanteil aus, der bspw. aus vorlesungsbegleitenden Praktika und zwei mehrwöchigen Hauptvermessungsübungen (Möller u. a., 2018) sowie einem einwöchigen GNSS-Praktikum (Seitz und Mayer, 2018) besteht. Die Regelstudienzeit des Bachelorstudiengangs beträgt sechs Semester. Die Höchststudiendauer ist auf neun Semester begrenzt.

Um Studierende zu unterstützen, eventuelle Fehlentscheidungen bei der Studienwahl frühzeitig erkennen zu können, wurde – wie schon im Diplomstudiengang – als Orientierungsprüfung die Modulprüfung "Vermessungskunde I" eingeführt. Auch die Freiversuchsregelung, die Studierende zum frühzeitigen Ablegen semesterbegleitender Prüfungen ermuntern soll, wurde aus dem Diplomstudiengang übernommen, allerdings auf die ersten drei Fachsemester des Studiums beschränkt. Um Bachelorstudierenden einen nahtlosen Übergang in den Masterstudiengang zu ermöglichen, können unter gewissen Voraussetzungen Masterveranstaltungen belegt werden, auch wenn das Bachelorstudium noch nicht vollständig abgeschlossen ist (Mastervorzugsleistungen).

Der Bachelorstudiengang "Geodäsie und Geoinformatik" hat sich seit seiner Einführung zum WS 2008/2009 bis heute strukturell und inhaltlich nur wenig geändert. Lediglich in einzelnen Bereichen wurde nachjustiert und zum WS 2015/2016 eine neue Prüfungsordnung mit folgenden Änderungen in Kraft gesetzt:

- Intensivierung der Programmierausbildung (C/C++, Java) durch Reduktion der Grundlagenausbildung in Informatik,
- Einführung einer eigenen Lehrveranstaltung zur bedeutsamen Laserscanning-Technologie,
- Streichung der Freiversuchsregelung, da sie von den Studierenden häufig nicht zielführend in Anspruch genommen wurde,
- Neuausgestaltung der Orientierungsprüfung: Neben "Vermessungskunde I" wurde zusätzlich die Modulprüfung "Höhere Mathematik I" hinzugenommen, um frühzeitig Rückmeldung hinsichtlich der Studierfähigkeit in diesen beiden maßgeblichen Bereichen geben zu können,
- Sicherstellung von Grundlagenwissen im mathematisch-physikalischen Bereich zu Beginn der Bachelorarbeit (Voraussetzung: erfolgreich bestandene Prüfungen des Faches "Mathematisch-Physikalische Grundlagen").

Tab. 6: Fächer und Module des Bachelorstudiengangs (Stand: WS 2008/2009).

Nr.	Fach	LP	Module	LP
1	Mathematik	23	• Höhere Mathematik I	9
			• Höhere Mathematik II	9
			• Differentialgeometrie	5
2	Physik	21	• Physik	16
			• Mechanik	5
3	EDV und Informatik	16	• Informatik	9
			• Datenverarbeitung	7
4	Grundlagen der geodätischen Datenanalyse	15	• Geodätische Datenanalyse I	9
			• Geodätische Datenanalyse II	6
5	Geoinformatik	17	• Geoinformatik I	5
			• Geoinformatik II	6
			• Geoinformatik III	6
6	Vermessungskunde	11	• Vermessungskunde I	4
			• Vermessungskunde II	7
7	Sensorik und Messtechnik	16	• Sensorik und Messtechnik I	9
			• Sensorik und Messtechnik II	7
8	Fernerkundung & Bildverarbeitung	16	• Fernerkundung	7
			• Photogrammetrie und Bildverarbeitung	9
9	Geodätische Referenzsysteme	15	• Mathematische Modelle	4
			• Physikalische und Mathematische Geodäsie	11
10	Geodätische Raumverfahren	9	• Positionsbestimmung mit GNSS	3
			• Satellitengeodäsie	6
11	Landmanagement	4	• Kataster und Flurneuordnung	2
			• Immobilienwirtschaft	2
12	Allgemeinbildende Fächer mit Schlüsselqualifikationen	8	• Geowissenschaften	3
			• Schlüsselqualifikationen	5
	Bachelorarbeit	9	6 Wochen	
	Berufspraktische Tätigkeit	–	12 Wochen	
	Summe aller LP		180	

Ferner musste die Studienkommission auf Änderungen in den formalen Vorgaben (KIT, 2013) reagieren und z. B. den Umfang der Bachelorarbeit von 9 LP auf 12 LP erhöhen (Bearbeitungsdauer: 8 Wochen), die Anzahl der Fächer durch inhaltlich sinnvolles Zusammenfassen

von ursprünglich zwölf auf sieben reduzieren sowie das Berufspraktikum als außercurriculare Leistung aufgeben.

Aufgrund der bestandenen Bachelorprüfung wird am KIT der akademische Grad "Bachelor of Science (B.Sc.) in Geodäsie und Geoinformatik" verliehen. In Tabelle 7 ist der Studienablaufplan des Bachelorstudiengangs (Stand 2018) dargestellt.

5.2 Masterstudiengang

Im Masterstudium vertiefen und ergänzen Studierende die im Bachelorstudiengang erworbenen Kompetenzen. Qualifikationsziele des Masterstudiengangs fokussieren deshalb auf Fähigkeiten, um

- wissenschaftliche Erkenntnisse und Methoden selbständig zu entwickeln und anzuwenden, ihre Bedeutung für die Lösung komplexer wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Problemstellungen bewerten und auch in neuen unvertrauten Situationen anzuwenden und weiterzuentwickeln zu können,
- relevante Informationen sammeln, bewerten und interpretieren und daraus wissenschaftlich fundierte Urteile ableiten zu können,
- fachbezogene Positionen und Problemlösungen formulieren und argumentativ verteidigen zu können,
- eigenständige forschungs- und anwendungsorientierte Projekte durchführen zu können,
- sich selbständig neue Kompetenzen aneignen zu können und
- herausgehobene Verantwortung in einem Team übernehmen zu können.

Die Regelstudienzeit des Masterstudiengangs beträgt vier Semester mit gleichzeitiger Begrenzung der zulässigen Höchststudiendauer auf sieben Semester. Dabei bestehen hinsichtlich der wissenschaftlichen Vorkenntnisse und Vorleistungen die folgenden fachbezogenen Zulassungsvoraussetzungen (KIT, 2012):

- Mathematik: mindestens 15 LP,
- Physik: mindestens 14 LP,
- Informatik (Grundlagen, Geoinformatik, Datenverarbeitung): mindestens 22 LP,
- Geodäsie (Grundlagen, angewandte und Höhere Geodäsie, Datenanalyse): mind. 35 LP,
- Fernerkundung und Bildverarbeitung: mindestens 10 LP.

Tab. 7: Studienablaufplan des Bachelorstudiengangs (Stand 2018).

1. Semester		2. Semester		3. Semester		4. Semester		5. Semester		6. Semester	
Höhere Mathematik I 8 LP		MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN / 43 LP Höhere Mathematik II 8 LP		Differentialgeometrie 7 LP		Grundlagen kinematischer u. dynamischer Modelle der Geodäsie 4 LP					
Experimentalphysik 8 LP		IT UND Datenverarbeitung 10 LP						Geoinformatik II 8 LP		Geoinformatik II 4 LP	
Grundbegriffe der Informatik 4 LP		Geoinformatik I 5 LP									
Vermessungskunde I 4 LP		Vermessungskunde II 7 LP		VERMESSUNGSKUNDE UND GEODÄTISCHE SENSORIK / 44 LP Sensorik und Messtechnik I 7 LP		Sensorik und Messtechnik II 7 LP					
				Geodätische Datenanalyse I 5 LP		Geodätische Datenanalyse II 2 LP					
						PHOTOGRAMMETRIE, FERNERKUNDUNG UND RAUMVERFAHREN / 24 LP Fotogrammetrie und Bildverarbeitung 7 LP		PHOTOGRAMMETRIE UND BILDERARBEITUNG / 16 LP Photogrammetrie und Bildverarbeitung 6 LP			
				MATHEMATISCHE REFERENZSYSTEME UND RAUMVERFAHREN / 24 LP Mathematische Geodäsie 4 LP		Mathematische Geodäsie 8 LP		Physikalische Geodäsie 7 LP		Physikalische Geodäsie 5 LP	
				KARTOGRAPHIE UND LANDMANAGEMENT / 8 LP Kataster und Flurneuordnung 2 LP		Kartographie und Kartenprojektionen 4 LP		Satellitengeodäsie 6 LP		Satellitengeodäsie 7 LP	
				ÜBERFACHLICHE QUALIFIKATIONEN / 6 LP		Schlüsselqualifikation (2) 3 LP		Schlüsselqualifikation (3) 2 LP		BACHELORARBEIT 12 LP	
Schlüsselqualifikation (1) 1 LP		Schlüsselqualifikation (1) 1 LP									
30 LP		31 LP		30 LP		32 LP		29 LP		28 LP	
BACHELORSTUDIENGANG GEODÄSIE UND GEOINFORMATIK / STUDIENABLAUF											
180 LP											

Sie werden von Absolventen des KIT-Bachelorstudiengangs "Geodäsie und Geoinformatik" grundsätzlich erfüllt. Auf die Festlegung einer Mindestnote im nachzuweisenden Bachelorabschluss wird verzichtet.

Der konsekutive KIT-Masterstudiengang "Geodäsie und Geoinformatik" ist stark forschungsorientiert und basiert auf einer Weiterentwicklung der bisher im Diplomhauptstudium praktizierten und bewährten Lehrkonzepte. Er weist eine klare Strukturierung in Aufbau-, Profil- und Ergänzungsbereiche auf, wobei jeder Profildbereich wiederum Pflicht- und Wahlpflichtmodule beinhaltet. Die einzelnen Bestandteile des Masterstudiengangs sind in Tabelle 8 dargestellt.

In den obligatorischen Aufbaufächern werden die aus verschiedenen Fachgebieten und von unterschiedlichen nationalen und internationalen Hochschulen stammenden Studierenden an ein gemeinsames Kompetenzniveau herangeführt. Alle Studierenden wählen zwei aus sechs angebotenen Profilen, wodurch die fachliche Breite ebenso gewährleistet wird wie die fachliche Vertiefung. Die Aufbaufächer sowie die Pflichtmodule der gewählten Profile werden in den ersten beiden Semestern absolviert. Das dritte Semester widmet sich der fachlichen Vertiefung, wobei die Wahlmöglichkeit im Profildbereich sowohl eine Spezialisierung entsprechend der individuellen Interessen der Studierenden ermöglicht als auch Flexibilität für den Studiengang sicherstellt, um auf die rasch wechselnden Anforderungen des Faches und des Arbeitsmarkts angemessen reagieren zu können. Das vierte Semester ist für die Masterarbeit vorgesehen, die hinsichtlich des Umfangs der früheren Diplomarbeit entspricht (6 Monate). Aufgrund der bestandenen Masterprüfung wird am KIT der akademische Grad "Master of Science (M.Sc.) in Geodäsie und Geoinformatik" verliehen. In die entsprechenden Urkunden ist der Hinweis

Tab. 8: Struktur des Masterstudiengangs (Stand 2018).

Aufbaufach	32 LP	
Profildächer mit Pflicht- und Wahlprofilmodulen (Wahl von 2 aus 6 Profilen)		
• Computer Vision – Bildanalyse und Sensorik		
• Ingenieurnavigation und Prozessmonitoring		
• Erdsystembeobachtung – Geomonitoring & Fernerkundung	46 LP	Summe
• Geoinformatik – Modellierung, Verwaltung und Analyse von Geodaten		120
• Earth Observation – Part A		
• Earth Observation – Part B		
Ergänzungsfach	8 LP	
Überfachliche Qualifikationen	4 LP	
Masterarbeit	30 LP	

aufgenommen, dass Masterabschlüsse dieselben Berechtigungen wie die früheren Diplom- und Magisterabschlüsse der Universitäten verleihen. Beim Entwurf des Masterstudiengangs wurde sichergestellt, dass Absolventen der konsekutiven Bachelor- und Masterstudiengänge "Geodäsie und Geoinformatik" gleichzeitig die fachlichen Voraussetzungen für die Zulassung zum "Vorbereitungsdienst für den Höheren vermessungstechnischen Verwaltungsdienst (Referendariat)" erfüllen.

Die klare Strukturierung des Masterstudiengangs in Aufbau-, Profil- und Ergänzungsbereich sowie Überfachliche Qualifikationen und Masterarbeit wurde seit dessen Konzeption im Jahr 2008 bis heute beibehalten. Auch die für eine Zulassung nachzuweisenden wissenschaftlichen Vorkenntnisse und Vorleistungen wurden nur unwesentlich modifiziert. Um allerdings den Studiengang auch international attraktiver zu gestalten, wurden im Profildbereich die angebotenen Profile neu ausgerichtet und zwei englischsprachige Profile zum Sommersemester 2012 eingeführt. Seither ist es durch entsprechende Modulwahl möglich, den Masterstudiengang wahlweise in deutscher oder englischer Studienvariante zu absolvieren.

Ergänzend zum bisherigen englischen Studienangebot startete zum WS 2018/2019 der neue Studiengang "Remote Sensing and Geoinformatics", der insbesondere auf internationale Studierende abzielt, die ihre berufliche Zukunft in europäischen Institutionen wie der European Space Agency (ESA) sehen. Inhaltlich werden in diesem Studiengang die Profile "Computer Vision", "Geoinformatics", "Remote Sensing of the Atmosphere" und "Environmental Geodesy" angeboten, wovon zwei von den Studierenden zu wählen sind. Hauptverantwortlich für diesen Studiengang ist das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung. Das Geodätische Institut ist insbesondere in den Profilen "Geoinformatics" und "Environmental Geodesy" maßgeblich ausgestaltend aktiv.

6 Herausforderungen und ziieldienliche Maßnahmen

Gesellschaftliche Veränderungen und geänderte universitäre bzw. hochschulpolitische Rahmenbedingungen koppeln kontinuierlich in die universitären Karlsruher Geodäsiestudiengänge rück und werden dort ziieldienlich aufgenommen. Dies gilt aktuell und das galt ebenso in der Historie. Neben der Umstellung auf Bachelor- und Masterstudiengänge sind aktuell insbesondere die weitreichende Fusion von Universität (Campus Süd) und Forschungszentrum (Campus Nord) und das daran anschließende Zusammenwachsen zum KIT als Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft prägend. Die Auswirkungen des noch andauernden Prozesses – bspw. werden aktuell Anstrengungen intensiviert, Mitarbeitende des Campus Nord verstärkt

in die Lehre einzubeziehen – ergeben für die Lehre neue Chancen, Aufgaben und Paradigmen, die eine stetige Weiterentwicklung erforderlich machen. Um die KIT-Leitbilder mit Leben zu erfüllen sind insbesondere Interdisziplinarität und Internationalität sowie Forschungsorientierung – auch für die Lehre – bedeutsam. Gleichzeitig sind dies Aspekte, die für die universitäre Geodäsieausbildung in Karlsruhe stets Arbeitsparadigmen darstellen, da

- Interdisziplinarität für geodätisches Arbeiten grundlegend ist,
- Internationalität in der studentischen Ausbildung bspw. im Rahmen von Auslandsprojekten unverzichtbar ist und
- Forschungsorientierung durch das Einbeziehen der Studierenden in wissenschaftliche Projekte oder das Vorstellen von studentischen Abschlussarbeiten auf der Geodätischen Woche bzw. auf DVW-Seminaren gelebtes Selbstverständnis ist.

Das signifikant geänderte studentische Klientel (z. B. erhöhte Heterogenität durch unterschiedliche Bildungshistorien, erhöhte Internationalität aufgrund signifikant erhöhtem Anteil ausländischer Studierender, jüngere Studierende durch G8 bzw. Wegfall von Sozial-/Wehrdienst, reduzierte Klarheit des Berufsbilds durch Wegfall des Vorpraktikums) fordert von Studiengängen ebenfalls neue und zielführende Maßnahmen. In diesem Kontext profitieren Geodäsie-studierende vom baden-württembergischen MINT-Kolleg (<https://www.mint-kolleg.kit.edu/>), einer Verbundeinrichtung der beiden Landesuniversitäten KIT und Universität Stuttgart. Das MINT-Kolleg unterstützt bspw. Studierende vor Studienbeginn und in den ersten Fachsemestern mit einem zusätzlichen Lehrangebot in den MINT-Fächern Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik. Hierdurch kann die bedeutsame Studieneingangsphase von Studierenden individuell ausgestaltet werden. Als vergleichbar wichtige KIT-Infrastruktur können KIT-Studierende Lehr- und Beratungsangebote des House of Competence (HoC, <https://www.hoc.kit.edu/>) der zentralen, forschungsbasierten Einrichtung im Bereich fachübergreifender Kompetenzentwicklung (z. B. Lernen organisieren, präsentieren und kommunizieren, methodisch arbeiten, wissenschaftlich schreiben) nutzen.

Um die Studieneingangsphase für Geodäsiestudierende über die zentralen KIT-Angebote hinaus passgenau und integrativ vernetzt in Lehrveranstaltungen des Pflicht-Curriculums auszugestalten, wird das Lehrangebot in enger Kooperation mit zentralen KIT-Einheiten kontinuierlich weiterentwickelt. Hierbei werden z. B. in der neu geschaffenen Lehrveranstaltung "Fit für Studium und Beruf" im ersten Fachsemester auch Maßnahmen berücksichtigt, die eine frühe Berufsorientierung sicherstellen und gleichzeitig die studentischen Selbstkompetenzen (z. B. Reflexionskompetenz) stärken. Für weitere Beratungsangebote in den Studiengängen stehen ausgebildete Studienlotsen zur Verfügung, die in Ergänzung zu bestehenden Beratungsange-

boten (z. B. Studiendekan, Fachstudienberater, Fachschaft) individuelle und niederschwellige Formate zur Information und Unterstützung (z. B. Kurzinputs, Sprechstunden) anbieten.

7 Kooperationen, Deutsch-Französischer Doppelstudiengang und Auszeichnungen

Stellvertretend - und ohne Anspruch auf Vollständigkeit - für herausragendes Engagement in der Weiterentwicklung und der Ausgestaltung des Lehrangebots sowie dem studentischen Wirken in den Studiengängen "Geodäsie und Geoinformatik" sollen in diesem Kapitel ausgewählte repräsentative Beispiele einen Einblick geben.

Wie auch in der Forschung stellen Kooperationen in der Lehre eine wichtige Komponente der studentischen Ausbildung dar. National kommt dabei engagiert mitarbeitenden Lehrbeauftragten eine bedeutsame Rolle zu. International bestehen langjährige und erfolgreiche Kooperationen (z. B. Budapest University of Technology and Economics, Ungarn; TU Delft, Niederlande; Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasilien (PROBRAL, 2012)). Hier von profitieren Studierende im Rahmen von Auslandspraktika oder -semestern und können so Mobilität und Interkulturalität erfahren und dokumentieren. Zum Wintersemester 2007/2008 startete zudem ein von der Universität Karlsruhe bzw. dem KIT und dem Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg (INSA) unter dem Dach der Deutsch-Französischen Hochschule (DFH) getragener Doppelstudiengang, der sowohl zum Abschluss "Master of Science (M.Sc.) in Geodäsie und Geoinformatik" als auch zum Titel "Ingénieur INSA de Strasbourg, Spécialité Topographie" führt. Die Studierenden absolvieren dabei die ersten vier Semester an ihrer jeweiligen Heimathochschule, bevor sie für drei Semester an die Partneruniversität wechseln. Danach wird das Studium an der Heimathochschule fortgeführt. Die Abschlussarbeit kann wahlweise in Frankreich oder Deutschland abgelegt werden. Die Karlsruher Studierenden des Doppelstudiengangs besuchen in diesem Kontext vor ihrem Auslandsaufenthalt die ersten vier Semester des Bachelorstudiengangs "Geodäsie und Geoinformatik" und nach den drei Semestern in Strasbourg die vier Semester des Masterstudiengangs "Geodäsie und Geoinformatik". Sie erhalten vom KIT sowohl das Bachelor- als auch das Master-Zeugnis. Die Gesamtstudien-dauer beträgt 10 + 1 Semester. Nach erfolgreicher Evaluierung fördert der Hochschulrat der DFH den deutsch-französischen Studiengang "Geodäsie und Geoinformatik/Topographie" seit dem akademischen Jahr 2017/18 für weitere vier Jahre. Der Antrag auf Förderung wurde von einer Gutachterkommission aus französischen und deutschen Hochschullehrern geprüft und anschließend vom Wissenschaftlichen Beirat der DFH (<https://www.dfh-ufa.org>) zur

Stellungnahme vorgelegt. Besonders positiv wurde hervorgehoben, dass sich der Studiengang sowohl international als auch in seiner thematischen Ausrichtung deutlich von klassischen Studiengängen abhebt. Der Studiengang zeichnet sich weiterhin insbesondere durch die hohe Qualität des Curriculums, die Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Profilen und die sehr gute Betreuung aus. Er bietet durch die Mehrsprachigkeit zudem eine besondere Qualifikation für Führungskräfte und dient somit als Sprungbrett in eine internationale Karriere.

Die Vielfalt der Studierenden und der Lehrenden in den Studiengängen "Geodäsie und Geoinformatik" ist groß. Ebenso umfassend sind die Auszeichnungen, die Absolventen und Lehrende in der nahen Vergangenheit erhalten haben. In den letzten Jahren wurden Studierende bspw. mit

- dem Exzellenzpreis der Deutsch-Französischen Hochschule,
- Tulla-Medaillen, der höchsten Auszeichnung der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften,
- begehrten Deutschland-Stipendien,
- dem Preis des Deutschen Akademischen Auslandsdienstes (DAAD) für ausländische Studierende am KIT,
- einem DAAD-Stipendium,
- Preisen für hohes gesellschaftliches Engagement oder
- Preisen für Abschlussarbeiten (z. B. Umweltpreis der Sparkasse Karlsruhe, Preis der gemeinsamen Kommission "3D Stadtmodelle" der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) und der Deutschen Gesellschaft für Kartographie (DGfK))

ausgezeichnet (siehe Abschnitt „Studentische Ehrungen, soziales Engagement und Auslandsaufenthalte“, Seite 377). Lehrende erhielten mehrmals den Lehrpreis der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften (siehe Abschnitt „Die personelle Entwicklung am Geodätischen Institut“, Seite 359).

8 Ausblick

Als grundlegende Auflage des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst in Baden-Württemberg sind neu eingeführte Studiengänge stets verpflichtet, sich einem standardisierten Akkreditierungsverfahren zu unterziehen. Beiden "Geodäsie und Geoinformatik"-Studiengängen wurde im Januar 2015 im Rahmen der KIT-Programmevaluation "Lehre und Studium (KIT-PLUS)" (KIT, 2018b) die erfolgreiche interne Akkreditierung bescheinigt. Zum

kommenden Wintersemester 2018/19 startet die Re-Akkreditierungsphase, die ein wichtiges Instrument darstellt, um die kontinuierliche Weiterentwicklung der Lehre sicherzustellen; bspw. wird durch externe Gutachter der Abgleich von Innen- und Außensicht gewährleistet. Das erscheint insbesondere deshalb sinnvoll, weil die Zyklen, in denen auf Veränderungen zu reagieren ist, als immer kürzer wahrgenommen werden können. Zum einen gilt es, in Studiengängen die technologischen Innovationen sowie deren Anwendungen in der Praxis kontinuierlich gegenüber den Qualifikationszielen abzugleichen, um bedarfsgerecht auszubilden. Zum anderen ist auf veränderte politische und verwaltungstechnische Rahmenbedingungen zu reagieren und diese bspw. in neuen Studien- und Prüfungsordnungen abzubilden.

Waren in der Praxis nach Einführung der neuen gestuften Bachelor-/Masterstudiengänge zunächst Unsicherheiten über die Qualifikationen von Bachelor- und Masterabsolventen festzustellen, so sind diese mittlerweile ausgeräumt. Derzeit sind die Berufsaussichten unserer Absolventen hervorragend. Der Bedarf in der freien Wirtschaft sowie in Forschung und öffentlicher Verwaltung kann durch die Anzahl der Absolventen an den Hochschulen bei weitem nicht gedeckt werden.

Nicht zuletzt bescheinigt dies der "Geodäsie und Geoinformatik"-Ausbildung am KIT, die aktuell im Wesentlichen von den drei Lehrstühlen des Geodätischen Instituts (Vermessungskunde und Geodätische Sensorik, Physikalische und Satellitengeodäsie (ab WS 2018/2019 Geodätische Erdsystemwissenschaft), Geoinformatik) sowie vom Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung und durch die Erfahrung von Lehrbeauftragten aus der Berufspraxis getragen wird, eine ausgezeichnete Leistung für ein Berufsfeld mit hoher gesellschaftlicher Relevanz. Dies stellt gleichzeitig eine Selbstverpflichtung für die Aufgaben der Zukunft dar, denen wir uns sehr gerne stellen.

Literatur

- Bologna-Deklaration (1999): The Bologna Declaration of 19 June 1999: Joint declaration of the European Ministers of Education. URL: http://www.magna-charta.org/resources/files/BOLOGNA_DECLARATION.pdf (besucht am 04. 09. 2018).
- Heck, B. und Rösch, N. (2009): Die Ausbildung der Geodäten an der Universität Karlsruhe (TH) im Wandel der Zeit. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 134(4):201–208.
- KIT (2012): Satzung für das hochschuleigene Zugangs- und Auswahlverfahren im Masterstudiengang Geodäsie und Geoinformatik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). URL: http://gug.bgu.kit.edu/downloads/zugangs_auswahl_msc_gug_2012_AB_018.pdf (besucht am 04. 09. 2018).
- KIT (2013): Rahmenordnung für die Studien- und Prüfungsordnungen der Bachelorstudiengänge am KIT. Beschluss des KIT-Senats vom 21. Oktober 2013. URL: https://www.kit.edu/downloads/AmtlicheBekanntmachungen/Rahmenordnung__fuer_die_Studien-_und_Pruefungsordnungen_der_Bachelorstudiengaenge_am_KIT.pdf (besucht am 04. 09. 2018).

- KIT (2018a): Leitbild. URL: <https://www.kit.edu/kit/leitbild.php> (besucht am 04. 09. 2018).
- KIT (2018b): Programmevaluation Lehre und Studium: KIT-PLUS. URL: <https://www.sek.kit.edu/458.php> (besucht am 04. 09. 2018).
- Möller, D., Maier, U., Juretzko, M., Vetter, M. und Illner, M. (2018): Die Hauptvermessungsübungen (1868-2018). In: *Festschrift zur 150-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts*. Bd. 2018-2. Karlsruhe (KIT Scientific Publishing): Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik.
- PROBRAL (2012): Highly Precise Positioning and Height Determination using GPS – Results of a PROBRAL project by Universidade Federal do Paraná (UFPR, Curitiba, Brazil) and Karlsruhe Institut of Technology (KIT, Karlsruhe, Germany). Hrsg. von M. Mayer, C. P. Krueger und B. Heck. Karlsruhe Institute of Technology, KIT Scientific Reports 7604.
- Seckel, H. (1993): Entwicklung der Studienpläne und Prüfungsordnungen. In: *Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts*. Universität Fridericiana Karlsruher (TH): Geodätisches Institut, S. 78–83.
- Seitz, K. und Mayer, M. (2018): Das GNSS-Praktikum (1995-2018). In: *Festschrift zur 150-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts*. Bd. 2018-2. Karlsruhe (KIT Scientific Publishing): Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik.

Die Hauptvermessungsübungen (1868 - 2018)

**Dieter Möller, Udo Maier, Manfred Juretzko, Martin Vetter
und Michael Illner**

1 Messtisch und Bussolenzüge (1868 - 1968)

Dieter Möller¹

Mit dem Begriff "Hauptvermessungsübungen" (HVÜ) verbindet sich nicht nur bei den ehemaligen Studenten der Geodäsie, sondern auch bei vielen Bauingenieuren, die in Karlsruhe studiert haben, der Gedanke an Furtwangen im Schwarzwald; eine kleine Stadt – 150 km vom Hochschulort entfernt – die auch außerhalb Badens durch ihr historisches Uhrenmuseum bekannt ist. Gerade für die Bauingenieure sind wohl diese Übungen eine bleibende Erinnerung an die Vermessungskunde; denn die Frage, ob die "HVÜ" noch immer in Furtwangen stattfindet, wird uns sehr oft gestellt, sei es auf einer Großbaustelle in Mannheim, bei einer Besprechung in Bremerhaven oder bei einem Zusammentreffen in Afrika. Im gleichen Atemzug werden dann einige – meist fröhliche – Reminiszenzen aus der Übungszeit zum Besten gegeben, und eine gute Zusammenarbeit ist schon fast garantiert. Womit eigentlich nachträglich noch einmal ein voller Übungserfolg zu bestätigen wäre.

Größere zusammenhängende Vermessungsübungen wurden bereits vor der Gründung des Geodätischen Instituts in der Umgebung von Karlsruhe durchgeführt, und auch Professor Jordan ließ in den ersten Jahren seit 1868 im Raume Karlsruhe mit dem Messtisch kleinere Gebiete im Maßstab 1:1000 aufnehmen. Doch bereits 1872 wurde das Messgebiet aus der Stadtnähe in die Gegend von Kirchzarten, 1878 nach Ottenhöfen im Schwarzwald verlegt und

¹ Überarbeiteter Beitrag aus der Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts aus dem Jahr 1993



Abb. 138: Teilnehmer der HVÜ 1900.

Messtisch- und Zahlentachymetrie geübt. Diese Gebiete sind in den Maßstäben 1:1500 und 1:2500 bearbeitet worden, und Prof. Jordan hat einen Teil der Übungsergebnisse zu Genauigkeitsuntersuchungen vorhandener amtlicher Karten verwendet. Weitere Übungsaufgaben sind vom Großherzoglichen Topographischen Bureau für die badische topographische Karte 1:25000 mitbenutzt worden.

Auch das Messgelände um Ottenhöfen scheint nicht ganz ideal gewesen zu sein, denn 1892 wurden erstmalig – wie in einer alten Furtwanger Zeitung nachzulesen ist – die Vermessungsübungen unter der Leitung von Professor Haid in der Umgebung von Furtwangen abgehalten. Für diese "größere geodätische Exkursion" bewilligte das Kultusministerium versuchsweise einen außerordentlichen Zuschuss in Höhe von 360.- Mark.

Dieser Versuch muss wohl als geglückt bezeichnet werden, denn die Zuschüsse wurden weiter bewilligt, und bereits 1902 feierten die Studenten mit einem Fackelzug ihren verehrten Lehrer Prof. Haid und die 10. HVÜ am gleichen Ort (Abb. 138). Die örtliche Polizeimacht war angewiesen, alle Augen zuzudrücken. Die weiteren Übungen konnten bis 1913 in Furtwangen reibungslos durchgeführt werden, während 1914 die Arbeiten vorzeitig "am 31. Juli gegen 17 Uhr wegen Erklärung des Kriegszustandes" beendet wurden.

Schon 1919 waren die Studenten unter Leitung von Professor Näbauer wieder in Furtwangen, mussten jedoch in den Jahren 1920 bis 1923 aus finanziellen Gründen ihre Übungen in der Nähe von Karlsruhe auf der Gemarkung Berghausen im Pfinztal abhalten (siehe Abb. 139). Danach wurde bis 1939 Furtwangen jedes Jahr erneut Universitätsstadt auf Zeit, und nur einmal musste der Herr Bürgermeister der Stadt schriftlich um ernstliche Ermahnung allzu übermüti-



Abb. 139: Berghausen 1921.

ger Studenten bitten, da die Nachtruhe der Marktplatzanwohner trotz der Bemühungen des Polizeibeamten zu sehr gestört worden war. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang noch die durch Prof. Näbauer 1925 veranlasste Ergänzung eines Landeserlasses "die Handhabung der Feldpolizei betreffend". Danach durften nun auch "Lehr- und Hilfskräfte des Geodätischen Instituts der Technischen Hochschule Karlsruhe und Studierende der Geodäsie (Vermessungskunde)" auf solchem Gelände Forschungs- und Studienarbeiten vornehmen, dessen Betreten nach Reichsstrafgesetzbuch, Polizeistrafgesetzbuch und Feldpolizeiverordnung allgemein verboten war.

Nach dem Zweiten Weltkrieg konnten die ersten Hauptvermessungsübungen 1947 und 1948 im Raume Karlsruhe organisiert werden. 1949 gelang es Professor Schlötzer und Professor Merkel mit Erlaubnis der amerikanischen und der französischen Militärregierungen und nach Überwindung vieler anderer Schwierigkeiten, die Übungen wieder in Furtwangen durchzuführen. Zeitungsartikel unter der Überschrift "Die Studenten sind wieder da" galten keinesfalls als Warnung für die Bevölkerung, sondern drückten die Freude darüber aus, dass eine alte Tradition fortgesetzt wurde. So konnte dann 1959 auf Einladung von Professor Lichte das Geodätische Institut zusammen mit den Vertretern des Landes, der Stadtverwaltung und der Bevölkerung im Kreise der Studenten ein doppeltes Jubiläum feiern. In diesem Jahr wurde die 50. Furtwanger HVÜ abgehalten und außerdem war Prof. Merkel genau vor 50 Jahren als junger hoffnungsvoller Student von Triberg über Schönwald mit Sack und Pack für 14 Tage nach Furtwangen gewandert, um zum ersten Male an einer solchen Übung teilzunehmen, die

er später lange Jahre mit viel Mühe und Liebe vorbildlich organisierte und betreute und deren Leitung er nun letztmalig übernommen hatte.

Selbstverständlich hat sich der Charakter der Hauptvermessungsübungen im Laufe der Zeit geändert, da jedoch der Aufbau und die Art der ersten Furtwängener Übung für lange Zeit maßgebend war, soll hier etwas näher auf dieselbe eingegangen werden. Der Zweck der Übungen war 1892 – wie auch heute noch für die HVÜ B (Bauingenieure) und die HVÜ I (Geodäten) – die Herstellung einer topographischen Karte des Messgeländes. Als Grundlage für die Aufnahme standen Trigonometrische Punkte des vorhandenen Dreiecksnetzes der badischen Landesvermessung und die durch trigonometrische Höhenmessung festgelegte und auf Mittelmeerhöhe bezogene Höhe des Knopfes der Kirchturmspitze in Furtwangen zur Verfügung. Durch Richtungsbeobachtungen mit Mikroskoptheodoliten (Schätzung der Doppelsekunden an zwei Kreisstellen) und einfache Dreiecksberechnung mit Mittelbildung wurden weitere Trigonometrische Punkte, die nach – sicher besonders tüchtigen – Studenten benannt worden waren, im badischen Soldner-System festgelegt. Die Höhenbestimmung der Trigonometrischen Punkte erfolgte durch Nivellement oder gegenseitige trigonometrischer Höhenmessung im Anschluss an die ebenfalls trigonometrisch festgelegte Höhenmarke an der Kirche. Das Festpunktnetz war anschließend durch Polygonzüge mit Höhenübertragung nach Lage und Höhe zu verdichten. Zur eigentlichen topographischen Geländeaufnahme wurden Tachymeterzüge und Bussolenzüge gemessen und auf den Festpunkten tachymetrische Einzelaufnahmen und Messtischaufnahmen mit der Kippregel ausgeführt. Dabei hatte jeweils eine Studentengruppe eine "Section" von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ zu bearbeiten und im folgenden Winter die topographische Karte im Maßstab 1:1500 zu zeichnen. Während der ersten Übung in Furtwangen sind in zwei Wochen drei Sectionen aufgenommen worden. Die Berechnungsunterlagen und Originalkartierungen haben – wie auch die meisten damals eingesetzten Instrumente – alle Kriegs- und Nachkriegswirren überstanden und werden heute noch im Geodätischen Institut aufbewahrt.

Bis zum Ersten Weltkrieg wurden alle Übungen in der skizzierten Art durchgeführt, wobei maximal 59 Studenten an einer HVÜ teilnahmen, und zwar neben Geodäten und Bauingenieuren auch Architekten und ein Förster.

Die erste Nachkriegs-HVÜ im Jahre 1919 brachte als Änderung – die bis 1961 in Furtwangen beibehalten wurde – die Aufnahme eines Gebietes von $750\text{ m} \times 750\text{ m}$ im Maßstab 1:2500. Merkel hat diese – mit nur 13 Studenten durchgeführte und damit gut überwachte – Aufnahme zu Genauigkeitsuntersuchungen der amtlichen topographischen Karte 1:25000 herangezogen.

Über 100 Studenten haben erstmalig 1921 an einer HVÜ teilgenommen, nachdem diese Übungen auch für die Bauingenieure Pflicht geworden waren.

Im Jahre 1922 wurde neben der topographischen Geländeaufnahme (nun HVÜ I) eine Katasteraufnahme nach den amtlichen badischen Vorschriften als HVÜ II eingeführt, wobei jede Gruppe ein Handrissgebiet sowohl nach dem Orthogonalverfahren wie nach dem Polarverfahren mit einem Zeiss-Boßhardt-Reduktionstachymeter aufzunehmen hatte.

Nachdem 1920 die erste Nivellementslinie der Landesvermessung bis Furtwangen beobachtet worden war, wurden ab 1925 auch für die Übungen alle Höhen über NN im alten System berechnet. Ein Vergleich zwischen den alten Höhen und den Höhen über NN ergab über eine Reihe identischer Punkte eine mittlere Differenz von $-2,25\text{m}$, die im Rahmen der Genauigkeit des amtlichen trigonometrischen Höhennetzes gut mit den Angaben nach Knäble (Höhenänderung des alten Bezugspunktes Straßburger Münster $-2,02\text{m}$ und im südlichen Landesteil etwa $-2,30\text{m}$) übereinstimmte.

Eine Erweiterung der HVÜ erfolgte 1928 durch die Einführung der terrestrischen Photogrammetrie, und ab 1934 wurden auch barometrische Höhenmessungen im Rahmen dieser Übungen durchgeführt. Aus einem zusammenfassenden Bericht von Prof. Schlötzer über die Übungen 1937 geht hervor, dass damals bereits die Hauptvermessungsübungen voll den Richtlinien von 1938 im Rahmen der neuen Studienordnung für Studierende des Vermessungswesens entsprachen.

Die ersten Furtwängener Nachkriegsübungen fanden 1949 nur für Geodäten statt, da die Unterbringung der Teilnehmer recht schwierig war und für alle Studenten die Hoover-Speisung im Übungsort ausgegeben werden musste. Ab 1950 durften auch wieder Bauingenieure mit nach Furtwangen, und erst ab 1956 wurde die Teilnahme an der HVÜ für Bauingenieure wieder obligatorisch.

Während bis 1954 Geodäten und Bauingenieure in gemischten Gruppen arbeiteten, wurden seit 1955 die Geodäten der HVÜ I in eigenen, intensiver betreuten Gruppen zusammengefasst, und ab 1961 nimmt jede Geodätengruppe auch ihr eigenes Gebiet von etwa $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ selbständig auf. Zugunsten einer selbständigeren Arbeitsweise der Studenten wird seit 1962 auch bei den Bauingenieuren (HVÜ B) auf ein gemeinsames Arbeitsgebiet verzichtet, und jede Gruppe hat ein eigenes Gebiet von ca. $250\text{ m} \times 300\text{ m}$ aufzunehmen. Eine weitere wesentliche Neuerung ist die Einführung einer HVÜ III für Geodäten im selben Jahr. Im Rahmen dieser Übungen sollen die Studenten besonders die Handhabung moderner elektromagnetischer Streckenmessgeräte kennenlernen.

Seit 1963 werden die photogrammetrischen Übungen nicht mehr bei Furtwangen, sondern am – für terrestrische Photogrammetrie besser geeigneten – Kaiserstuhl durch das Institut für Photogrammetrie und Topographie unter Leitung von Prof. Schwidewsky durchgeführt.

In den letzten Jahren hat sich die im Folgenden aufgezeigte Organisation der Hauptvermessungsübungen eingespielt und gut bewährt. Jeweils am Ende des Sommersemesters werden alle Übungen innerhalb von 3 Wochen in der Umgebung von Furtwangen unter Leitung der Professoren Lichte, Draheim und Kuntz abgehalten.

Die HVÜ III der Geodäten im 6. Semester hat folgende Aufgaben durchzuführen:

- Signalisierung der für die eigenen Übungen sowie für die HVÜ I und HVÜ B erforderlichen trigonometrischen Alt- und Neupunkte durch Dreibocksignale, die – wohl schon von Prof. Näbauer eingeführt – die gleichzeitige Verwendung als Stand- und Zielpunkt gestatten.
- Triangulation einschließlich trigonometrischer Höhenmessung der Neupunkte für die anderen Hauptvermessungsübungen und zweier Basisvergrößerungsnetze mit Punktverlegungen.
- Messung von Feinpolygonzügen mit 2 m-Basislatten durch steiles, dicht bewaldetes Gelände zur weiteren trigonometrischen Punktbestimmung, ebenfalls mit trigonometrischer Höhenübertragung.
- Berechnung vorläufiger Koordinaten der Neupunkte und der Punkte der Basisvergrößerungsnetze im Gauss-Krüger-System und Berechnung der Höhen über NN.
- Messung der Basisvergrößerungsnetze mit Geodimeterfeinmessung zur Bestimmung der ca. 1 km langen Basis und Winkelmessung mit Wild T 3.
- Elektrooptische Nachtmessungen und elektronische Messungen mit 10 cm, 3 cm und 8 mm Wellenlänge der langen Diagonalen (ca. 5 km).
- Messungen außerhalb des eigentlichen Arbeitsgebietes von größeren Strecken nach demselben Verfahren mit dem Fernziel, endgültige Gauß-Krüger-Koordinaten für das Messgebiet zu bestimmen.
- Barometrische Höhenmessungen nach verschiedenen Verfahren auf einer Vergleichsstrecke mit rund 1.000 m Höhenunterschied zwischen Waldkirch und dem Kandelgipfel.
- Die endgültige Auswertung aller Messungsergebnisse erfolgt im Wintersemester.

Die HVÜ II der Geodäten des 4. Semesters beginnt gleichzeitig mit der HVÜ III und dauert zwei Wochen. In der dritten Woche nehmen die Studenten des 6. Semesters an den schon erwähnten Übungen am Kaiserstuhl teil.

- Die HVÜ II hat im Anschluss an vorgegebene trigonometrische Punkte zunächst ein Polygonnetz mit Reduktionstachymetern mit horizontaler Latte zu messen.
- Pro Gruppe mit 4 bis 6 Studenten wird dann ein Gebiet von ca. 200 m × 200 m mit 20 bis 25 Grundstücken, entsprechend der amtlichen badischen Anweisung, polar und orthogonal aufgenommen.
- Die Berechnungen werden bis zur Koordinatenbestimmung aller Grenzpunkte im badischen Soldner-System in Furtwangen ausgeführt, sodass sichergestellt wird, dass alle Aufnahmen innerhalb der amtlichen Fehlergrenzen bleiben.
- Im anschließenden Wintersemester werden die Vergleiche der verschiedenen Verfahren durchgeführt, außerdem die Katasterpläne und die Grundstücksflächen numerisch und halbgraphisch berechnet.

Die HVÜ I der Geodäten des 2. Semesters beginnt eine Woche nach den Übungen III und II und dauert 2 Wochen.

- Die Gruppen mit 5 bis 6 Studenten haben nach einer Triangulation unter Verwendung der bereits aufgebauten Signale und einfacher Auswertung durch Berechnung von Vorwärts- und Rückwärtseinschnitten einen Polygonzug in ihrem jeweiligen Messgebiet mit 5 m-Latten und Minutentheodolit zu messen.
- Ferner sind trigonometrische Höhenmessungen und Nivellements zur Höhenbestimmung der trigonometrischen Punkte und der Polygonpunkte durchzuführen.
- Die topographische Geländeaufnahme erfolgt durch Tachymeterzüge mit Reduktionsdistanzmessern und Bussolenzüge sowie als Einzelpunktaufnahme unter Verwendung der Reichenbach'schen Distanzfäden.
- Abschließend sind Kontrollzüge zu messen, deren Höhenangaben zur Bestimmung der mittleren Höhenfehler der im Maßstab 1:2500 im Winter auszuarbeitenden Karten dienen.

Da die Anzahl der Bauingenieurstudenten bis auf 200 pro Semester anstieg, ist die HVÜ B in den letzten Jahren auf eine Woche reduziert worden, sodass in der zweiten und dritten Woche der Gesamtübungszeit jeweils ein Kurs für Bauingenieure abgehalten werden kann.

- Jede Gruppe hat – ähnlich wie bei der HVÜ I – durch Polygonzugmessung, Nivellement, Tachymeterzug und tachymetrische Einzelaufnahmen das Gelände so zu erfassen, sodass im folgenden Wintersemester ein eigener Höhenschichtplan im Maßstab 1:1000 kartiert werden kann.
- Um diese Ausarbeitung sicherzustellen, müssen noch in Furtwangen alle Züge sowie Nivellements berechnet werden und ggf. Nachmessungen erfolgen.

Damit ergibt sich eine harte Arbeitswoche für die Studenten. Trotzdem wird auch in den letzten Jahren in Furtwangen nicht nur gemessen und gerechnet; denn die nahegelegene Linachsperrre lockt zu einer abendlichen Badefahrt und einem nächtlichen Lagerfeuer. Das nahe Ende einer HVÜ kündigt häufig ein Fußballspiel zwischen dem 6. Semester der Geodäten und den Institutsangehörigen an, wobei letztere seit Jahren von einem knappen Sieg träumen und erstere von einem zweistelligen Ergebnis; bis jetzt – leider – beide Seiten vergeblich.

Abschließend muss an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass bei allem guten Willen des Instituts, eine alte Tradition zu bewahren, es besonders dem großzügigen Entgegenkommen der Stadtverwaltung von Furtwangen, des Don-Bosco-Heimes und des Studentenheimes der Ingenieurschule sowie der Bevölkerung in und um Furtwangen zu verdanken ist, dass in diesem Jahr die 59. Furtwangener HVÜ stattfinden konnte, an welcher der 4.444ste Student teilnahm.

2 Die EDM Ära (1968 - 1993)

Udo Maier²

Die Hauptvermessungsübungen bilden nach wie vor einen wichtigen Schwerpunkt bei der Ausbildung der Geodäten; denn nirgendwo sonst lassen sich praktische vermessungstechnische Kenntnisse besser vermitteln als bei solchen Intensivkursen, wo die Studenten an einem größeren zusammenhängenden Projekt arbeiten und die Ergebnisse ihrer Bemühungen in kürzester Zeit zu Gesicht bekommen und beurteilen können.

Die Aufteilung der einzelnen Hauptvermessungsübungen wurde auch in den vergangenen 25 Jahren gemäß Tabelle 9 beibehalten.

Hinzu kommt für das 4. Semester eine einwöchige Übung zur Photointerpretation mit Feldvergleich und terrestrischer Photogrammetrie. Diese Übung findet in der Woche vor den Furtwanger Hauptvermessungsübungen am Kaiserstuhl statt.

Solange für die Bauingenieure die Teilnahme an den Hauptvermessungsübungen B, die nur eine Woche dauern, Pflicht war, d. h. von 1956 bis 1965, wurden diese in zwei einwöchigen Kursen nacheinander abgehalten. Seit 1966 ist die Teilnahme wieder freiwillig, und es genügt ein einwöchiger Kurs. In den letzten Jahren ist jedoch das Interesse so stark angestiegen, dass aus logistischen Gründen (Geräte, Quartiere u. a.) die Teilnehmerzahl auf 60 begrenzt werden musste.

Die Aufgabe der HVÜ I besteht nach wie vor in der Aufnahme und Darstellung (1:2500) eines 300 m × 400 m großen Gebietes je Gruppe. Gegenüber früher haben sich aber die Mess- und Rechenhilfsmittel geändert: Statt mit 5 m-Latten werden die Polygonseiten heute mit 2 m-Basislatte, die Detailpunkte teils mit Reduktionstachymetern (z. B. Wild PDS), teils mit elektronischen Tachymetern gemessen. Die Messergebnisse werden mit Taschenrechnern und Formularen ausgewertet.

Bei der HVÜ II wurde die Aufgabenstellung in den letzten Jahren etwas erweitert. Zu Beginn werden nach Katasterunterlagen Grenzen wiederhergestellt. Sodann wird innerhalb der wiederhergestellten Grenzen ein Bebauungsplan entworfen, wobei auch eine Zuteilungsberechnung nach vorgegebenen Flächenansprüchen durchgeführt wird. Seit 1991 kommt hierbei auch CAD-Software zum Einsatz. Dieser Entwurf wird in die Örtlichkeit übertragen und mit Pflöcken vermarktet. Die anschließende Aufnahme erfolgt mit dem Linear- und dem Polarverfahren.

² Überarbeiteter Beitrag aus der Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts aus dem Jahr 1993

Tab. 9: Aufteilung der einzelnen Hauptvermessungsübungen.

HVÜ	Semester
HVÜ I	für Geodäten des 2. Semesters, topographische Geländeaufnahme, (2 Wochen)
HVÜ II	für Geodäten des 4. Semesters, Katasteraufnahme, (2 Wochen)
HVÜ III	für Geodäten des 6. Semesters, Landesvermessung und Ingenieurvermessung, (3, seit 1972 2 Wochen)
HVÜ B	für Bauingenieur-Studenten des 2. Semesters, topographische Geländeaufnahme, (1 Woche, Teilnahme freiwillig)

Im Laufe der Jahre haben hierbei auch elektronische Tachymeter mehr und mehr Eingang gefunden. Für die Weiterverarbeitung der elektronisch registrierten Messdaten mit PCs wird z. Z. Software an unserem Institut entwickelt.

Bedingt durch die stürmische Entwicklung in der Gerätetechnik und den Messverfahren hat die HVÜ III gegenüber den anderen Hauptvermessungsübungen die weitestgehenden Veränderungen erfahren. Über viele Jahre lag der Schwerpunkt der HVÜ III bei der elektronischen Messung langer Strecken. Die hierbei verwendeten Geräte geben einen Eindruck von

Tab. 10: Langstreckengeräte.

Gerätename	Einsatzzeitraum
Tellurometer MRA 2	1962 - 1985
Geodimeter NASM 4 B	1962 - 1965
Geodimeter 6	1966 - 1968
Tellurometer MRA 4	1968 - 1982
Wild Distomat DI 50	1966 - 1985
Geodimeter 8	1969 - 1985
Tellurometer CA 1000	1973 - 1987
SIAL MD 60	1981 - 1991
Rangemaster 3 A	seit 1981

der instrumentellen Entwicklung in dieser Zeit. Im Einzelnen kamen die in der Tabelle 10 aufgelisteten Langstreckengeräte zum Einsatz.

Eines der ursprünglichen Ziele beim Einsatz dieser Geräte war eine Verdichtung des Hauptdreiecksnetzes, um für das Übungsgebiet in Furtwangen Gauss-Krüger-Koordinaten für den Institutsgebrauch zu erhalten, denn das alte badische Soldner-Netz erwies sich wegen seiner Spannungen als ungeeignet für unsere Vermessungsübungen.

Dieses Ziel wurde 1974 erreicht: In einer Diplomarbeit wurden alle bis dahin verfügbaren und brauchbaren Messungen in einer Ausgleichung zusammengefasst, und es entstanden die "System-74-Koordinaten". Um 1981 war die amtliche Netzverdichtung der Landesvermessung so weit vorangeschritten, dass ein Vergleich zwischen unseren "System-74-Koordinaten" und den amtlichen endgültigen Gauss-Krüger-Koordinaten möglich wurde. Dabei ergaben sich Differenzen von maximal 11 cm.

Die elektronischen Streckenmessungen im Landesdreiecksnetz des südlichen Schwarzwaldes werden bis heute weiter durchgeführt. Seit 1988 tritt zu den herkömmlichen Messverfahren das "Global Positioning System" (GPS) als neues großräumiges Messverfahren hinzu. Mit Wild-Magnavox-Satellitenempfängern WM 101 bzw. 102 wurden Punktbestimmungen parallel zu den terrestrischen Messungen durchgeführt.

Die Basisvergrößerung im Bregtal wurde bis 1971 beibehalten. Danach diente eine Dreieckskette längs des Bregtals als Übungsobjekt. Die Richtungen wurden mit Sekundentheodoliten, die Strecken mit den neu aufkommenden Nahbereichs-Distanzmessern wie z. B. Tellurometer MA 100 gemessen. Wegen der fortschreitenden Wohnbebauung an den Hängen des Bregtals im Stadtgebiet von Furtwangen wurde es immer schwieriger, diese Übung durchzuführen. Wir haben daher 1984 diese Übung in das Neuweg-Tal, einige Kilometer nordwestlich von Furtwangen, verlegt. Dort bestimmen einzelne Bauernhöfe mit Weideflächen das Landschaftsbild, und wir können so unsere Übung ohne große Behinderung durchführen.

Die Beschaffung des Präzisions-Distanzmessers Mekometer ME 3000 war für uns der Anlass, im Jahr 1974 auch Elemente einer Staumauer-Überwachungsmessung in das Übungsprogramm einzubeziehen. Als Objekt bot sich die Linachssperre an: Sie ist von Furtwangen aus gut zu erreichen, auch sind von der Landesvermessung dort bereits Beobachtungspfeiler vorhanden. Die Richtungen wurden mit Wild T 3, später mit Kern DKM 3, die Strecken mit dem Mekometer ME 3000, seit 1988 mit dem moderneren Mekometer ME 5000 und die Höhen mit dem Feinnivellier Zeiss Jena Ni 002 gemessen. Beim Vergleich der Ausgleichungsergebnisse über die Jahre hinweg ergab sich nebenbei, dass einer der Pfeiler sich jedes Jahr um etwa einen

Millimeter talabwärts bewegt, eine Beobachtung, die uns auch vom Landesvermessungsamt bestätigt wurde.

Die "Barometrische Höhenmessung", die bis 1975 an der Straße zwischen Waldkirch und dem Kandelgipfel durchgeführt wurde, ist inzwischen aus dem HVÜ-III-Übungsprogramm herausgenommen und wird im Rahmen der Vermessungsübungen 8 an der Straße von Sasbach zur Hornisgrinde im Nordschwarzwald durchgeführt.

Für die Auswertung des Messmaterials der HVÜ III war früher eine eigene Lehrveranstaltung im folgenden Wintersemester eingeplant. Dank der modernen Computertechnik ist es in den letzten Jahren möglich geworden einen immer größer werdenden Teil der Auswertearbeit mit umfangreicher am Institut entwickelter Software bereits in Furtwangen zu erledigen. Dies hat den Vorteil, dass man schnell einen Einblick in die Qualität des Messmaterials bekommt und dass z. B. grobe Fehler rechtzeitig aufgedeckt und durch Nachmessung behoben werden können.

Die Hauptvermessungsübungen I, II und B standen bis 1978 unter der Leitung von Prof. Lichte die 1979 von Prof. Ir. van Mierlo übernommen wurde. Prof. Kuntz leitete die HVÜ III bis 1990. Seit 1991 leitet Prof. Schmitt diese Übung.

Nicht nur Karlsruher, sondern auch Berliner Geodäsiestudenten hatten in den letzten drei Jahren Gelegenheit, die Vorzüge des Schwarzwaldes kennenzulernen: 1990 und 1991 nahmen einige Berliner Studenten an unserer HVÜ III teil, und 1992 entschloss sich das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der TU Berlin, eigene Hauptvermessungsübungen mit damals 13 Studenten in Furtwangen abzuhalten.

Im Jahr 1992 waren einhundert Jahre vergangen, seit unter Prof. Haid erstmals Hauptvermessungsübungen in Furtwangen stattfanden. Aus diesem Anlass erhielt die Stadt Furtwangen im Rahmen einer Feierstunde die Verdienstmedaille der Universität Karlsruhe aus der Hand von Prof. Draheim, Geodät und ehemaliger Rektor der Universität, überreicht.

Neben dem Fachlichen darf natürlich auch die gesellige Seite nicht zu kurz kommen. Gegen Ende der Hauptvermessungsübungen findet nach wie vor das traditionelle Fußballspiel zwischen dem 6. Semester und einer Institutsmannschaft statt, bei dem letztere vor einigen Jahren sogar einen zweistelligen Sieg erringen konnte. Ansonsten sind meistens die Studenten die Gewinner. Anschließend treffen sich alle HVÜ-Teilnehmer zu einem gemütlichen Beisammensein, bei geeignetem Wetter im Freien an einem Grillfeuer, ein Abend, an den man sich später gerne zurück erinnert.

3 Die digitale Ära (1993 - 2018)

Michael Illner, Manfred Juretzko und Martin Vetter

Nach wie vor sind die Hauptvermessungsübungen ein fester und zentraler Bestandteil des Geodäsiestudiums am Geodätischen Institut in Karlsruhe, auch wenn sich hier einiges gewandelt hat: Der Übergang vom Diplomstudium hin zu konsekutiven Bachelor- und Masterstudiengängen im Jahre 2008 ist an anderer Stelle in dieser Festschrift beschrieben (siehe Beitrag „Die universitäre Geodäsieausbildung in Karlsruhe – Historie, Gegenwart und Zukunft“ in dieser Festschrift). Auch die Neubesetzungen der zuständigen Lehrstühle mit teilweise elementaren Änderungen in deren inhaltlichen Ausrichtungen (siehe Beitrag „Das Geodätische Institut (1993 - 2018)“ in dieser Festschrift) haben den Fortbestand der Übungen nie in Frage gestellt. Die Übungen wurden auf hohem Niveau immer wieder aktuell gehalten. Dies wurde 2016 durch die Verleihung des Fakultätslehrpreises der Fakultät Bau-Geo-Umwelt im Rahmen der KIT-Jahresfeier gewürdigt.

Seit 1993 ist das Messgebiet der HVÜ I und II beim ehemaligen Caritasheim und heutigen Freizeithaus "Schlempen", welches in rund 1.000 m Höhe auf dem Bergrücken zwischen Furtwangen und St. Georgen liegt. Die Studierenden finden hier ideale Bedingungen für ihre Übungen und haben gleichzeitig sehr gute und preiswerte Übernachtungsmöglichkeiten. Die Bauern, auf deren Grundstücken die Übungen stattfinden, unterstützen seit Jahren diese traditionsreiche Lehrveranstaltung uneigennützig. Ihnen sowie allen Pächtern, Jägern und Forstverantwortlichen soll an dieser Stelle recht herzlich für ihr Entgegenkommen gedankt sein. Auch die Studierenden, die an der früheren HVÜ III und jetzigen Übung zum Fach "Schätztheorie und projektbezogene Datenverarbeitung" teilnehmen, wohnen auf dem "Schlempen" und fahren täglich zu ihrem Einsatzort an der Linachsperrle.

Instrumentell und besonders in der Weiterverarbeitung der Daten hat sich in den vergangenen 25 Jahren sehr viel weiterentwickelt. Deshalb ist dieser zeitliche Abschnitt der Hauptvermessungsübungen auch mit dem Titel "Die digitale Ära" überschrieben. Im Folgenden werden die letzten 25 Jahre aller drei Hauptvermessungsübungen von deren Hauptverantwortlichen vorgestellt.

3.1 Die Hauptvermessungsübungen I (HVÜ I)

Manfred Juretzko

Seit den Ursprüngen im Jahre 1892 ist der Zweck der HVÜ I, die Herstellung einer topographischen Karte, erhalten geblieben. Zu jeder Zeit wurden dafür die jeweilig aktuellen Verfahren und Vermessungsinstrumente eingesetzt. Aktuell bearbeiten die Studierenden diese Aufgabe in 3 bis 5 Gruppen von jeweils 3 bis 5 Personen pro Gruppe (siehe Abb. 140).

Aufbauend auf den Kompetenzen, die sich die Studierenden in den ersten beiden Semestern in den Vorlesungen und Übungen zur Vermessungskunde, CAD und GNSS erarbeitet haben, führen sie weitgehend selbständig alle Arbeitsschritte zur Erstellung einer Karte im Maßstab 1:2500 durch. Dabei verdichten sie ein vorgegebenes, nach Lage und Höhe getrenntes Festpunktfeld mit Hilfe von Polygonzügen und geometrischen Nivellements. Die Aufnahme der Objektpunkte erfolgt von den Polygonpunkten aus oder durch freie Stationierung mit Hilfe von registrierenden Totalstationen (Leica TPS1200), die über eine graphische Anzeige verfügen. Ergänzt wird die tachymetrische Aufnahme durch eine lokale Base-Rover-GNSS-Aufnahme mit dem System Leica GPS1200, die in das im Gauß-Krüger-System vorliegende Festpunktfeld transformiert wird. Die Aufbereitung der Messdaten anhand von Feldskizzen erfolgt mit dem Programm AutoCAD (siehe Abb. 141).

Somit fungiert die HVÜ I als "Dreh- und Angelpunkt" in der ersten Phase des Studiums: In zahlreichen Fächern der ersten beiden Semester dient sie als Motivation für den zu vermittelnden Stoff. In späteren Semestern kann auf die HVÜ I verwiesen werden, um anhand von Beispielen weitere Lehrinhalte darauf aufzubauen.

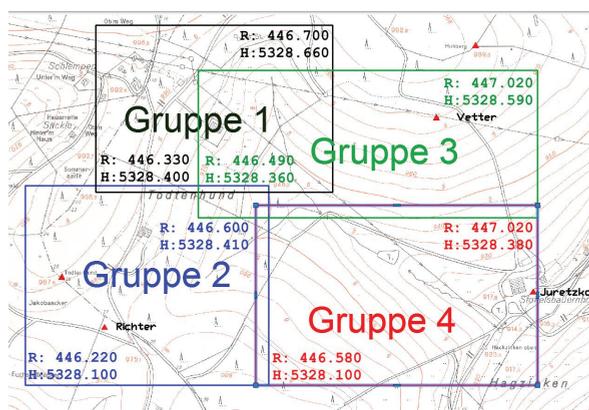


Abb. 140: Gebietsaufteilung der HVÜ I.

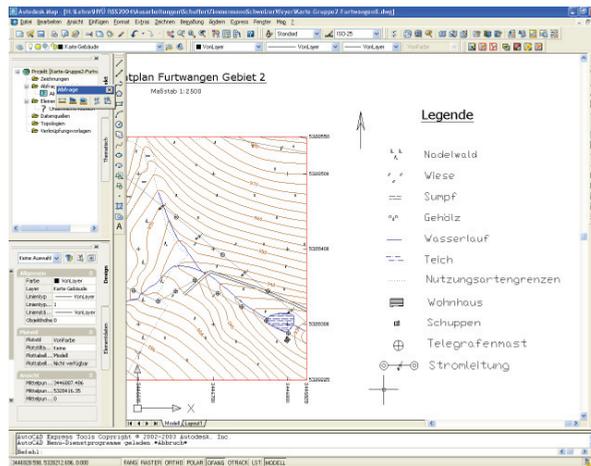


Abb. 141: Bearbeitung der Aufnahme mit AutoCAD.

3.2 Die Hauptvermessungsübungen II (HVÜ II)

Martin Vetter

Im Kern enthält die HVÜ II wie bisher eine Aufgabenstellung der Katastervermessung: In einem vorgegebenen Gebiet werden nach den Vorschriften der Katastervermessung die Grenzen zunächst im ursprünglichen Soldner-System hergestellt und anschließend nach ETRS89/UTM (bis 2007 nach DHDN/Gauß-Krüger) umgestellt. Im Anschluss daran werden die vorgegebenen Grundstücke im Rahmen einer Baulandumlegung neu aufgeteilt, Straßen und andere öffentliche Grundstücke werden ausgewiesen und in die Örtlichkeit übertragen.

Dabei hat die HVÜ II immer die aktuellen Entwicklungen sowohl bei der Technik als auch bei den amtlichen Vorgaben umgesetzt. Bereits 1991 wurden von den Studierenden PCs eingesetzt, um ein gruppenübergreifendes Polygonnetz durch strenge Ausgleichung auszuwerten. Die Einteilung des Bebauungsplans erfolgt seither auch über CAD (AutoCAD). Messtechnisch kommen registrierende Ingenieurtachymeter zum Einsatz, die entsprechend der technischen Entwicklung auch teilweise motorisiert sind. Ab 1999 konnten die Studierenden GNSS (Leica System 530) mit einer lokalen Referenzstation für die Aufnahme der Grenzpunkte einsetzen. Seit 2007 ist auch auf dem Schlempen ein (leider immer noch) rudimentärer Mobilfunkempfang möglich und gestattet die Verwendung des präzisen Echtzeitpositionierungsdienstes SAPOS[®] der Landesvermessung, wenn auch nur sehr eingeschränkt. Gleichzeitig bot es sich 2007 an, als Zielsystem für die Umstellung auf ETRS89/UTM überzugehen, obwohl dies erst 2017 als amtliches System in der Praxis in Baden-Württemberg eingeführt wurde.

Die Möglichkeit, Studierende in einer zweiwöchigen Übung weitgehend selbständig eine komplexe Aufgabe bearbeiten zu lassen, ist eine große Bereicherung des Studiums. Durch die technische Entwicklung hat sich aber der Zeitbedarf für die Bearbeitung der ursprünglichen Aufgabenstellung immer weiter reduziert. Der Wegfall der manuellen Rissführung und der analogen Datenhaltung zugunsten einer rein digitalen Datenhaltung und Kartenerstellung über CAD (Abb. 142) sowie bessere und schnellere Instrumente ermöglichten es, die HVÜ II mit neuen Inhalten zu ergänzen. Seit 2015 ist eine GIS-Komponente in die Übung integriert. Die Studierenden sammeln dabei im Vorfeld öffentlich zugängliche Informationen wie beispielsweise die Lage von Biotopen und berücksichtigen diese zusammen mit selbst erfassten Daten, wie z. B. Freileitungstrassen, bei der Einteilung ihres Bebauungsplans. Die Daten aller Gruppen werden danach in einem Geoserver zusammengeführt und können mit einem Auskunftssystem über das Internet abgerufen werden (Abb. 143). Insgesamt hat sich die HVÜ II auch dahin entwickelt, dass die Gruppen zwar unterschiedliche Gebiete bearbeiten, am Ende der Übung aber gruppenübergreifend ein "Gesamtkunstwerk" entsteht. Dies beginnt bei der gemeinsamen Planung, Messung und Auswertung des Grundlagentznetzes über die gruppenübergreifende Planung des Bebauungsplans bis zum Bereitstellen der Daten im Auskunftssystem. Dies erfordert die Entwicklung und Einhaltung von Standards durch die Gruppen selbst, ohne die eine gemeinsame Datenhaltung nicht möglich ist.



Abb. 142: Digitale Katasterkarte aller Gruppen.

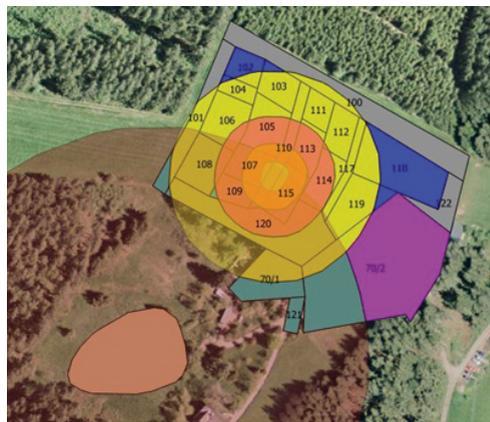


Abb. 143: GIS-Abfrage einiger Flurstücke mit verschiedenen Einflussfaktoren.

3.3 Die Hauptvermessungsübungen III (HVÜ III)

Michael Illner

Wie an anderer Stelle der Festschrift erwähnt war die seit 1962 bestehende HVÜ III stark von der gerätetechnischen Entwicklung beeinflusst, was sich auch unmittelbar auf den Inhalt und die von den Studierenden zu bearbeitende Aufgabenstellung auswirkte. So wurden 1992 für die Messungen im Landesdreiecksnetz letztmals Mikrowellenentfernungsmesser (Sial MD 60) eingesetzt, und auch die Messungen mit dem elektrooptischen Entfernungsmesser Rangemaster 3A (Keuffel & Esser) wurden letztlich zu Gunsten des Einsatzes von GPS aufgegeben.

3.4 GPS-/GNSS-Technologie

Die moderne GPS-Technologie wurde von 1988 bis 1991 zunächst im Landesnetz parallel zur Entfernungsmessung eingesetzt. Danach wurde die rapid-static Beobachtungstechnik von GPS im 1984 angelegten Neuwegnetz parallel zur herkömmlichen dreidimensionalen tachymetrischen Punktbestimmung genutzt (siehe Abb. 144). Zeitgleich wurde die Netzausgleichskomponente in der HVÜ III zur sachgerechten Auswertung der dreidimensionalen Messverfahren verstärkt. In den Jahren 1994 - 1997 wurden im Rahmen der HVÜ III und in Kooperation mit dem Landesvermessungsamt Baden-Württemberg – dem heutigen LGL – spezielle GPS-Projekte zur Untersuchung von Schwachstellen in dem damaligen Landesdreiecksnetz durchgeführt. 1998 wurde die immer mehr an Bedeutung gewinnende GPS-Komponente aus der HVÜ III ausgelagert. Seit dieser Zeit ist in den Studienplänen (Diplom-, Bachelorstudiengang) das einwöchige GPS-Praktikum als eigenständige Lehrveranstaltung verankert, wodurch der rasanten Entwicklung der GPS-Technologie sowie deren Einzug in die Vermessungspraxis Rechnung getragen wurde. Siehe hierzu den Beitrag „GPS-/GNSS-Praktikum – Eine studierendenzentrierte und kompetenzorientierte Lehrveranstaltung im Wandel der Zeit“ S. 317ff in dieser Festschrift. Ab dieser Zeit wurde GPS/GNSS nur noch als Hilfsmittel zum raschen Auffinden der unterirdischen Vermarkung für die Punkte des Neuwegnetzes eingesetzt. Durch den Wegfall der zeitintensiven GPS-Übungskomponente wurde die Dauer der HVÜ III konsequenterweise ab dem Jahr 1998 auf die Dauer von einer Woche verkürzt.

3.5 Ingenieurnetz Neuwegtal

Das bereits erwähnte Neuwegnetz diente in der HVÜ III als klassisches Ingenieurnetz, das von den Studierenden mit einer angestrebten Genauigkeit von 2 mm (mittlerer 2D-Punktlagefehler) zu bestimmen war. Mit einem Planungstool der am Geodätischen Institut in Zusammenarbeit mit der Fa. COS Geoinformatik GbR entwickelten Ausgleichungssoftware **NetzCG** führten die Studierenden vor Ort eine den praktischen Messungen vorgeschaltete Netzplanungsberechnung durch (siehe Abb. 145), deren zentrales Ergebnis ein zu realisierender Beobachtungsplan war. Damit wurde festgelegt, welche Messungen im Netz mit welcher Genauigkeit auszuführen waren, um die geforderten Maße hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit einzuhalten. Natürlich waren hierbei auch wirtschaftliche Gesichtspunkte zu beachten.

Das im Neuwegnetz eingesetzte Instrumentarium änderte sich durch die rasant fortschreitende technologische Weiterentwicklung fast jährlich. Es variierte von optisch-mechanischen Sekundentheodoliten (z. B. Kern DKM-2 A) mit aufsetzbaren Infrarot-Kurzstrecken-Entfernungsmessgeräten (Kern DM 503) über die ersten "Totalstationen" (HP 3820, AGA Geodimeter 142, Sokkisha Set 3C) bis hin zu dem zuletzt verwendeten motorisierten Tachymeter Leica TCRA 1201 mit automatisierter Zielerfassung (ATR).

3.6 Prüfstrecke Katzensteig

Von 1977 bis 2000 unterhielt das Geodätische Institut im Rahmen der HVÜ III im Katzensteigtal eine eigens angelegte EDM-Prüfstrecke, um für die im Einsatz befindlichen elektronischen Entfernungsmesser durch Messung und Auswertung von Teilstrecken in allen Kombinationen deren Gerätekonstanten zu ermitteln bzw. zu überprüfen. Danach wurde die Konstantenbestimmung in die in Karlsruhe veranstalteten Vermessungsübungen verlagert.



Abb. 144: GPS-Messungen im Neuwegnetz.



Abb. 145: Netzplanung Neuwegnetz.

3.7 Staumauerüberwachung Linachtalsperre

Im Zusammenhang mit der Entwicklung und Beschaffung des Präzisionsdistanzmessers Mekometer ME 3000 wurden im Jahre 1974 erstmals auch Überwachungsmessungen an der Linachtalstaumauer (Abb. 146) durchgeführt. Diese beschränkten sich wegen des hohen Aufwands zunächst auf die Beobachtung des vier Punkte umfassenden Pfeilernetzes sowie die Bestimmung eines Objektpunktes an der Staumauer (ab 1976 auf drei Objektpunkte erweitert). Die hochgenauen Schrägstrecken, die in der Auswertung noch meteorologisch und geometrisch zu reduzieren waren, lieferte der Distanzmesser ME 3000, die Richtungen wurden mit dem Wild T3 bzw. dem DKM 3 beobachtet. Auf Abbildung 147 ist Prof. Kuntz als Beobachter zu sehen. Die für die Reduktion erforderlichen Höhen in Millimetergenauigkeit wurden über Feinnivellement bestimmt. 1978 wurde das Pfeilernetz um einen Zentralpunkt auf fünf Punkte erweitert. Die Stabilität aller Pfeiler war in jeder Messepoche über Pfeilerkontrollnivellement nachzuweisen. 1988 wurde der Entfernungsmesser durch das neu erworbene Mekometer ME 5000 abgelöst. Parallel zum Feinnivellement wurden ab 1987 die Höhen der Punkte zusätzlich über das am Institut entwickelte Verfahren der gleichzeitig-gegenseitigen Zenitdistanzmessungen (GGZ) abgeleitet, dessen Genauigkeit durchaus mit dem des aufwändigen Feinnivellements konkurrieren konnte. Aufgrund einer weiter fortschreiten-



Abb. 146: Linachtalsperre.

den Entwicklung auf dem Gerätesektor konnte mit dem Leica TCA 2003 im Jahr 2002 zum ersten Mal ein Präzisionstachymeter mit hochgenauem Streckenmessteil und automatisierter Zielerfassung (ATR) angeschafft und zur Staudammüberwachung eingesetzt werden. Die Messdauer verkürzte sich rapide, und der Aufwand zur meteorologischen und geometrischen Reduktion verringerte sich ebenfalls. In diese Entwicklung fügten sich dann im Jahr 2010 der Präzisionstachymeter Leica TS 30 und 2015 die Multistation TS 50 mit Videofunktionalität und Photogrammetrieoption ein. Letztere ist in der Abbildung 148 zu sehen. Da nun für die durchzuführenden Überwachungsmessungen weniger Zeit benötigt wurde, war es möglich eine weitere Beobachtungskomponente in die Übung zu integrieren, die optische Lotung zu zwei Punkten der Mauerkrone mit dem Wild ZL bzw. dem Kern OL.

Aus dieser kurzen Schilderung ist ersichtlich, dass die HVÜ III stets davon geprägt war, die Studierenden bei der Übung mit dem aktuell modernsten Instrumentarium sowie den zugehörigen Auswertetechniken vertraut zu machen. Durch Einsatz auch konkurrierender Beobachtungstechniken (z. B. Feinnivellement-GGZ) lernten die Studierenden die Vorzüge aber auch die Nachteile der Verfahren kennen und konnten somit deren sinnvollen Einsatz aus eigener Erfahrung besser beurteilen.

Wegen nicht durchgeführter Sanierungsmaßnahmen musste 1988 der Stausee der Linachtalsperre abgelassen werden, und das Bauwerk war immer mehr dem Verfall preisgegeben. Im Jahr 2003 traf die Gemeinde Vöhrenbach als Betreiber der Talsperre den Beschluss zur Sanierung des Bauwerks, und im Jahr 2005 konnte mit der beschlossenen Generalsanierung begonnen werden, die 2007 ihren erfolgreichen Abschluss fand. In diesem Zusammenhang wurde das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL) sowie das Geodätische Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in die Erarbeitung eines neuen



Abb. 147: Distanzmesser Kern ME 3000.



Abb. 148: Präzisionstachymeter Leica TS 50.

geodätischen Überwachungskonzeptes für die Linachtalstaumauer eingebunden. Ziel war es, ein der modernen Beobachtungstechnik angepasstes Deformationsnetz zu entwerfen, das Aussagen über die Stabilität der Staumauer im Sinne statistisch fundierter Deformationsanalysen ermöglicht. Die Genauigkeitsanforderung für die geodätische Punktbestimmung in Lage und Höhe lag hierbei im Submillimeterbereich. Es bot sich die Gelegenheit, die geplanten Überwachungsmessungen an der Staumauer und deren Auswertung im Rahmen der HVÜ III zukünftig als Projektarbeit von Studierenden des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik durchführen zu lassen und die Ergebnisse der Stadt Vöhrenbach zur Übernahme in die amtlichen Unterlagen zu überlassen. Dies erfolgte erstmals 2008 und wurde fortgeführt bis ins Jahr 2010, in dem die HVÜ III offiziell letztmals stattfand. Der Grund hierfür lag in einer weitreichenden Studienplanreform, die durch den Bologna Prozess angestoßen war. Die Diplomstudiengänge mussten in Baden-Württemberg komplett aufgegeben werden. Stattdessen wurden zum Wintersemester 2008/09 die gestuften Bachelor-, Masterstudiengänge eingeführt, in denen die Durchführung einer HVÜ III nicht mehr vorgesehen war. Im Sommer 2000 fand auch letztmals die freiwillige Hauptvermessungsübung für Bauingenieure (HVÜ B) statt. Der zeitgleich in Kraft tretende neue Studienplan der Bauingenieure sah wichtige Prüfungen im Zeitfenster der Übung vor, was zum Aus für die zuvor sehr beliebte Veranstaltung führte.

3.8 Schätztheorie und projektbezogene Datenverarbeitung (Projektübung Linachtalsperre)

Michael Illner

Bei der Konzeption des Masterstudiengangs Geodäsie und Geoinformatik waren sich die Verantwortlichen einig, in die Aufbauveranstaltung "Schätztheorie und projektbezogene Datenverarbeitung" mit (2V+3Ü) und 6 LP neben Vorlesungen und Übungen auch die Bearbeitung eines umfangreicheren Projektes zu integrieren. Ziel ist es, die in der Lehrveranstaltung vermittelten Konzepte und Methoden der Schätztheorie und der Deformationsanalyse auf das Projekt Staumauerüberwachung zu übertragen und zielführend anzuwenden. Im Jahr 2012 wurde die Projektübung im Rahmen des Masterstudiengangs erstmalig an der Linachtalsperre durchgeführt und so die Komponente Staudammüberwachung der HVÜ III inhaltlich weitergeführt.

3.9 Verknüpfung verschiedener Methoden als Kern der Veranstaltung

Die geodätische Überwachung der Linachtalsperre erfordert die Verknüpfung einer klassischen Aufgabe der praktischen Ingenieurgeodäsie mit den modernen Auswertekonzepten der Schätztheorie – insbesondere mit der statistisch fundierten Deformationsanalyse.

Die Projektbearbeitung erfolgt in verschiedenen Phasen:

- Am Anfang steht eine Planung, wie das durch die Behörden vorgegebene Überwachungskonzept in die Praxis umzusetzen ist. Hierbei analysieren die Studierenden, welche geodätischen Messmethoden und welches Messinstrumentarium zu wählen sind, um den gestellten Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit gerecht zu werden.
- Vor Ort führen die Studierenden dann in kleinen Gruppen die entsprechenden Messungen selbstständig durch. Hierbei ist Teamarbeit gefordert und durch eine gruppenübergreifende Kommunikation zu gewährleisten, dass am Ende der Übung vor Ort alle zur Auswertung und Analyse der Daten notwendigen Elemente auch erfasst wurden.
- Das Prozessieren der erfassten Daten bis hin zur Bereitstellung und Visualisierung der endgültigen Auswerteergebnisse sowie deren Analyse und Bewertung schließen das Projekt ab.

3.10 Praktische Tätigkeit vor Ort

Vor Ort arbeiten die Studierenden in kleinen Gruppen mit geodätischem Instrumentarium höchster Präzision. Die Lage der im Deformationsnetz integrierten Stabil- und Objektpunkte wird von den Studierenden mit Präzisionstachymetern bestimmt, die auch eine georeferenzierte photogrammetrische Erfassung des Objektes erlauben. Somit lernen die Studierenden Vor- und Nachteile unterschiedlicher Methoden hinsichtlich Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit kennen und zu bewerten.

Zur Bestimmung des Höhenverhaltens der Punkte führen die Studierenden zum ersten Mal ein Präzisionsnivelement eigenständig durch. Die Stabilität der in der Deformationsanalyse als Referenzpunkte verwendeten Pfeiler wird von den Studierenden durch Pfeilerkontrollnivelements geprüft und analysiert. Alle vor Ort erzeugten Daten werden digital erfasst und bilden die Grundlage für den sich anschließenden Auswerteprozess.

3.11 Auswertung

Ziel des Auswerteprozesses ist, Aussagen bezüglich des Bewegungsverhaltens der Staumauer der Linachtalsperre in Lage und Höhe abzuleiten. Dabei ist die Bewegung der Staumauer durch eine umfangreiche Analyse der Messdaten zu quantifizieren und statistische Kennzahlen zur Qualitätsbeurteilung der abgeleiteten Bewegungsvektoren anzugeben. Diese für die Standsicherheit des Bauwerkes sensible Fragestellung erfordert in allen Stufen der Projektbearbeitung sorgfältiges und zuverlässiges Arbeiten. Das Bewusstsein, dass die Projektdaten Eingang in die amtlichen Überwachungsunterlagen finden, fördert die Motivation der Studierenden zusätzlich und sensibilisiert hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Bedeutung der Aufgabenstellung.

Um das Bewegungsverhalten der Staumauer zu beschreiben, werden statistische Verfahren der geodätischen Deformationsanalyse herangezogen, deren Grundlagen in der zugehörigen Vorlesung gelegt werden. Hierzu werden die Auswertergebnisse der aktuellen Epoche relativ zur unmittelbar vorangegangenen Epoche (Zeitbasis 1 Jahr) sowie relativ zur Nullmessung, die den gesamten Überwachungszeitraum seit 2007 umfasst, analysiert. Dabei werden die wissenschaftlichen Softwarepakete **NetzCG** sowie **Codeka2D** eingesetzt, welche die Studierenden in ihrem Studium bereits kennengelernt und angewandt haben (vgl. Abb. 149 und 150).

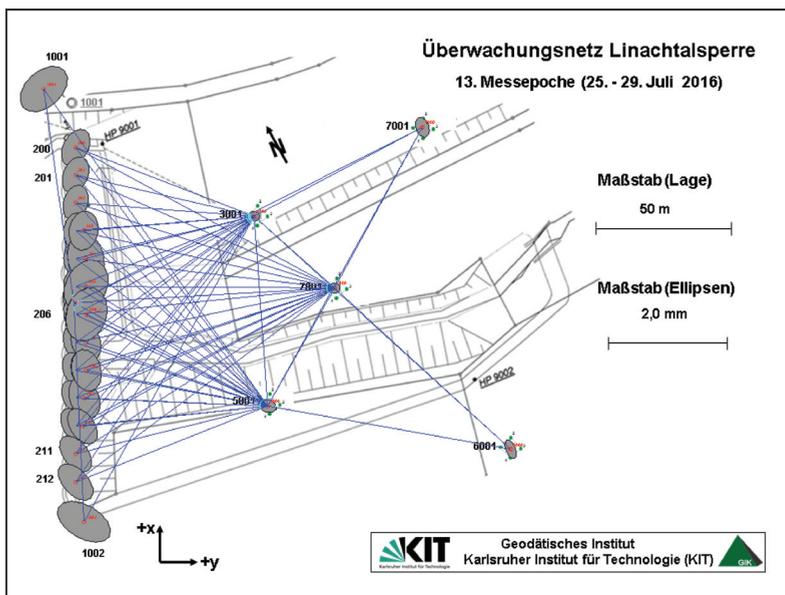


Abb. 149: Ergebnis der geodätischen Netzausgleichung.

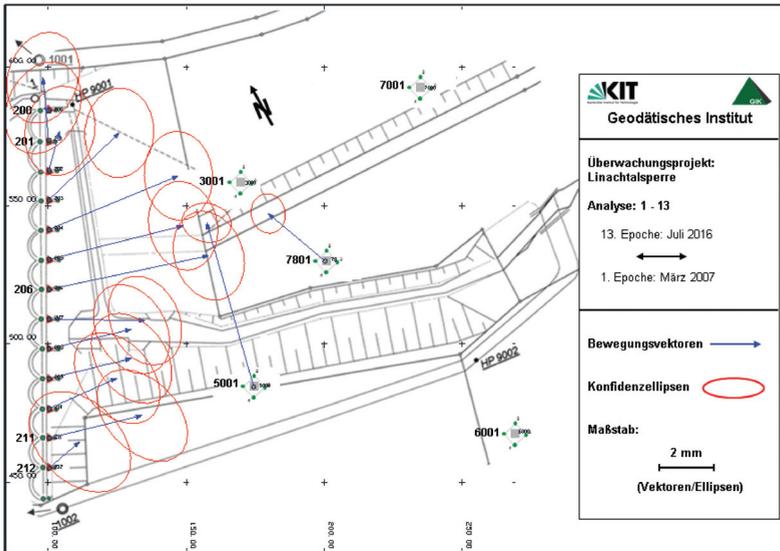


Abb. 150: Epochenvergleich 2016 - 2007.

Insgesamt ist das Projekt so konzipiert, dass es Aspekte der praktischen Ingenieurgeodäsie mit modernen Methoden der Schätztheorie und Datenanalyse verknüpft. Die Studierenden erfassen alle Messdaten eigenständig und werten diese nach wissenschaftlichen Methoden aus. Dadurch lernen sie alle Stufen der Bearbeitung eines geodätischen Überwachungsprojektes kennen. Die von ihnen erarbeiteten Ergebnisse werden an den Betreiber der Talsperre weitergegeben und sind Bestandteil der amtlichen Überwachungsunterlagen. Insofern dient die Arbeit der Studierenden nicht reinen Übungszwecken, sondern hat durch deren Weiterverwendung einen echten Mehrwert.

3.12 Jubiläum 125-Jahre Hauptvermessungsübungen

Am Donnerstag, 27. Juli 2017, konnte das 125-jährige Jubiläum der seit 1892 – mit kurzen Unterbrechungen infolge der Kriegsjahre – stattfindenden Hauptvermessungsübungen begangen werden. Bei laufendem Übungsprogramm fanden Veranstaltungen zur Feier des Jubiläums statt. Vormittags wurde im Rathaussaal der Stadt Vöhrenbach (Abb. 151) u. a. mit Vertretern von Hochschulen, Behörden, des freien Berufes und der Berufsverbände über die fachlichen Inhalte der drei Projektarbeiten sowie über Ausbildungsfragen allgemein diskutiert.



Abb. 151: Rathausaal Vöhrenbach.



Abb. 152: Festzelt "Auf dem Schlempen".

Am Nachmittag bestand Gelegenheit, die Projekte vor Ort zu besuchen und sich unmittelbar einen Eindruck von der Arbeit der Studierenden zu verschaffen.

Am Abend klang die Veranstaltung bei einem gemütlichen Beisammensein von Studierenden, Dozenten, Ehemaligen und weiteren Gästen "Auf dem Schlempen" in einem Festzelt aus (siehe Abb. 152), wo für ausreichend Grillgut und kalte Getränke gesorgt war.

GPS-/GNSS-Praktikum – Eine studierendenzentrierte und kompetenzorientierte Lehrveranstaltung im Wandel der Zeit

Michael Mayer¹ und Kurt Seitz²

¹ Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, KIT

² Geodätisches Institut (GIK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

1 Einleitung

Mit dem Bologna-Prozess (Bologna Working Group, 2005) sind einige der signifikantesten Veränderungen des Hochschulwesens verknüpft. Insbesondere ist darin die Kompetenzorientierung des Studiums (HRK, 2012) begründet. Individuelle Kompetenzen zeigen sich basierend auf Wissen, Fertigkeiten, Haltungen, Emotionen, Werten und Motivation in Situationen, in denen auf komplexe Anforderungen angemessen reagiert wird (OECD, 2003). Eine Bologna-konforme Kompetenzaneignung fokussiert zudem auf die künftige Beschäftigungsfähigkeit von Absolvent*innen (Schaper, 2012) und bereitet auf weiterqualifizierendes bzw. lebenslanges Lernen vor. Zudem koppelt der mit Bologna verknüpfte Paradigmenwechsel in Lehrgrundsätze wie z. B. Studierendenzentrierung (Jonassen, 1999) rück, wodurch Studierende ins Zentrum des Lernprozesses rücken und ihre Unterschiedlichkeiten Berücksichtigung in der Lehre finden.

Dieser Beitrag eröffnet Einblicke in die historische und die aktuelle Ausgestaltung der Lehrveranstaltung "GNSS-Praktikum" sowie der Vorläufer-Lehrveranstaltungen, die aufzeigen, wie für die universitären Karlsruher Geodäsie-Studiengänge schon vor Beginn des Bologna-

Tab. 11: Übersicht über die Kooperationspartner und Orte der GPS-/GNSS-Praktika.

Jahr	Kooperationspartner	Ort	Betreuer
SG II WS93/94	ÖbvI Büro Perlwitz	Am Runden Plom (Ettlingen)	Seitz, Heck
HVÜ III 1994	LVA-Karlsruhe	St. Georgen	Seitz
SG II WS94/95	ÖbvI Büro Perlwitz	Ettlingen/Oberweier	Seitz, Heck
HVÜ III 1995	LVA-Karlsruhe	Tennenbronn	Seitz
HVÜ III 1996	LVA-Karlsruhe	Buchenberg/Furtwangen	Seitz, Kuhn
HVÜ III 1997	LVA-Karlsruhe	Burladingen/Tailfingen	Seitz, Kuhn
1998	LVA-Karlsruhe	Turmberg/Waldbronn	Seitz, Kuhn
SG I, MG II SS98	ÖbvI Büro Perlwitz	Neumalsch B3/L608	Seitz, Kuhn
1999	WSV-Mainz	Lauterbourg/Weil a. R.	Seitz, Maier
2000	Stadt Mannheim	Friesenheimer Insel	Seitz, Mayer, Maier
2001	Stadt Mannheim	Friesenheimer Insel	Seitz, Mayer, Maier
2002	LVA-BW	Karlsruhe	Mayer, Seitz
2003	LV Gravimetrie	Turmberg/Karlsruhe	Mayer, Seitz
2004	LVA-BW	Karlsruhe und Umgebung	Mayer, Seitz, C. Schmitt
2005	Stadt Mannheim	Friesenheimer Insel	Mayer, Seitz, Snilil
2006	LVA-BW	Karlsruhe und Umgebung	Mayer, Seitz, Benner
2007	Stadt Mannheim	Friesenheimer Insel	Mayer, Seitz, Dierks
2008	LVA-BW	Karlsruhe und Umgebung	Mayer, Knöpfler, Seitz
2009	LRA Breisgau/ Hochschwarzwald	Staufen i. Brsg.	Mayer, Knöpfler, Schenk
2010	LRA Breisgau/ Hochschwarzwald	Staufen i. Brsg.	Mayer, Knöpfler, Schenk
2011	KIT/Geophysik	Engen	Knöpfler, Mayer
2012	Stadt Mannheim	Friesenheimer Insel	Knöpfler, Mayer
2013	Stadt Mannheim	Friesenheimer Insel	Knöpfler, Mayer
2014	Stadt Landau	Landau	Knöpfler, Mayer
2015	Stadt Heidelberg	Heidelberg	Mayer
2016	LGL-BW (Ref. 51)	Dobel/Karlsruhe	Mayer
2017		KIT-Campus	Mayer
2018		KIT-Campus	Sumaya

Prozesses dessen Anforderungen Selbstverpflichtung und intrinsisch motiviertes Arbeitsparadigma darstellten. Gleichzeitig können durch die rückblickende akzentuierte Betrachtung der kontinuierlichen Anpassung des Lehr-Lern-Systems des GPS-/GNSS-Praktikums geodätische Entwicklungen sichtbar gemacht werden.

2 Curriculare Einbindung

Das Geodätische Institut des KIT (Karlsruher Institut für Technologie) greift sowohl in der Forschung als auch in der Lehre stets neue, innovative Strömungen auf und lebt damit die

Tab. 12: Übersicht über die Zielsetzungen der GPS-/GNSS-Praktika.

Jahr	Zielsetzung
SG II WS93/94	Straßenschlussvermessung
HVÜ III 1994	Aufdeckung von Netzspannungen
SG II WS94/95	Straßenschlussvermessung
HVÜ III 1995	Aufdeckung von Netzspannungen
HVÜ III 1996	Pilotprojekt: Integration von GPS-Höhen in das amtliche Höhenfestpunktfeld
HVÜ III 1997	Integration von GPS-Höhen in das amtliche Höhenfestpunktfeld
1998	Aufdeckung von Netzspannungen
SG I, MG II SS98	Straßenschlussvermessung
1999	Einmessung von Standpunkten für mobile GPS-Referenzstationen für den Oberrheinausbau
2000	Nullmessung Monitoringnetz
2001	1. Wiederholungsmessung (WHM) Monitoringnetz
2002	Einschaltung der Permanentstation KARL in BWRef94
2003	3D-Koordinierung der Gravimetermesspunkte des GIK
2004	Kontrollmessung eines BWREF-Teilnetzes
2005	2. WHM Monitoringnetz
2006	Kontrollmessung eines BWREF-Teilnetzes
2007	3. WHM Monitoringnetz
2008	Teilbeobachtung des DHHN 1. Ordnung, Einbindung von Geodätischen Grundnetzpunkten und SAPOS [®] -Stationen
2009	Etablierung eines interdisziplinären Monitoringnetzwerks: Einmessung von InSAR-Corner-Reflektoren und Nullmessung eines GPS-Netzes
2010	Wiederholungsmessung Monitoringnetzwerk
2011	Festpunktfeldverdichtung als Grundlage für Schweremessungen
2012	4. WHM Monitoringnetz
2013	5. WHM Monitoringnetz
2014	Vergleichende Studie zum Monitoring von Geothermie-Anlagen
2015	Zur effizienten Brückenüberwachung mit GNSS
2016	Untersuchung zur Auswirkung einer geänderten Referenzstationsgeometrie auf die SAPOS [®] -Servicebereiche
2017	Weiterführung der BSc-Arbeit "Zur zuverlässigen und wirtschaftlichen NRTK-basierten Positionsbestimmung für Energieversorger"
2018	Zum Potenzial von absoluten GNSS-Einfrequenzmessungen im Kontext von Multifrequenz- und differenziellen Messkonzepten

Einheit von Forschung und Lehre (PEBA/KIT, 2014). Die Lehre im Rahmen des GPS-/GNSS-Praktikums belegt dies prototypisch sowohl durch die frühe Etablierung von Lehrveranstaltungsinhalten mit GPS-Fokus Anfang der 1990er Jahre als auch durch die kontinuierliche Validierung und Anpassung bspw. der trainierten Mess- und Auswertekonzepte. Im Folgenden werden die ersten Schritte der Einführung satellitengeodätischer Praktika (Abschnitt 2.1) sowie die aktuelle Ausgestaltung (Abschnitt 2.2) beschrieben.

2.1 Genesis des GPS-/GNSS-Praktikums

Die erste kommerziell verfügbare GPS-Ausrüstung (WILD/MAGNAVOX) wurde vom GIK Ende der 1980er Jahre beschafft und in der Lehre während der HVÜ3 eingesetzt, zunächst geschah dies zur Bestimmung von Raumstrecken über lange Distanzen im Vergleich zur EDM. Freilich oblagen damals noch die Bedienung dieser neuen Technologie und die gesamte Auswertung der gesammelten Daten den Betreuern.

Mit zunehmender Anzahl an verfügbaren GPS-Satelliten und handlicheren Ausrüstungen wurde das GPS-Verfahren auch zur Netzmessung als Teil der HVÜ3 etabliert. Gleichzeitig wurde am GIK auch die erforderliche Auswertesoftware zur Integration von GPS-Messungen in das Landessystem entwickelt (Illner und Jäger, 1993, 1995). Dies stellt einen starken Beleg dafür dar, wie sich am GIK Forschung und Lehre gegenseitig bereichern.

Das Thema "GPS" wurde in dieser Phase in die entsprechenden Lehrveranstaltungen aufgenommen. Hierzu wurden auch z. B. in "Satellitengeodäsie II" (SGII), einer Lehrveranstaltung für die G-Vertiefer im Diplomstudiengang, ab dem Wintersemester 1993/94 GPS-Messungen und -Auswertungen vorgenommen (siehe Tab. 11). Bereits wenige Jahre später wurden diese Inhalte vom Vertieferfach in das Grundstudium ("Satellitengeodäsie I" (SGI) und "Mathematische Geodäsie" (MGII)) integriert.

Bei der HVÜ3 wurden zunehmend die aufkommenden neuen GPS-Messtechniken (z. B. stop-and-go, rapid-static) erprobt. Im Jahre 1994 wurde im Rahmen der HVÜ3 in Zusammenarbeit mit dem Landesvermessungsamt (LVA) das erste größere GPS-Projekt durchgeführt. Es hatte die Aufdeckung von Netzspannungen im Landesnetz als Zielsetzung (vgl. Tab. 12). Dafür wurde eine der zwei HVÜ3-Wochen reserviert. Dreimal wurde in der Umgebung von Furtwangen (siehe Tab. 11) ein solches GPS-Projekt durchgeführt, bis im Sommersemester 1998 die eigenständige Lehrveranstaltung "GPS-Praktikum" aus der HVÜ3 ausgekoppelt wurde.

Von Anfang an war es den Verantwortlichen für das GPS-Praktikum wichtig, eine Aufgabenstellung in Kooperation mit Vermessungsbüros, -behörden und -ämter zu organisieren. Hieraus resultieren interessante, praxisrelevante und motivierende Fragestellungen. Darüber hinaus verstetigen sich die wichtigen Kontakte in die Vermessungspraxis; dies ist dem GIK stets ein wichtiges Anliegen.

Wie den Tabellen 11 und 12 zu entnehmen ist, kann das GPS-/GNSS-Praktikum in diesem Jahr auf eine 20-jährige Tradition zurückschauen.

2.2 In den aktuellen Studiengängen "Geodäsie und Geoinformatik"

Das GNSS-Praktikum findet aktuell im sechsten BSc-Semester statt (Illner u. a., 2018) und wird mit zwei Leistungspunkten vergütet; dies entspricht einer studentischen Arbeitsleistung von 60 Arbeitseinheiten à 45 Minuten. Die Lernziele der derzeitigen Ausgestaltung des GNSS-Praktikums sind (GUG/KIT, 2018):

- Die Studierenden führen ein GNSS-basiertes Vermessungsprojekt eigenverantwortlich durch. Dies umfasst die Projektplanung, die selbstständige Durchführung von statischen GNSS-Messungen sowie die Positionsbestimmung im Echtzeitmodus, eigenständige Auswertung und Evaluation der Ergebnisse.
- Die Studierenden kooperieren in Teams und präsentieren die Ergebnisse vor potenziellen Auftraggebern.

Hierzu bearbeiten Studierende ein GNSS-Messprojekt im Sinne eines integrierten Praktikums. Zentrale Aspekte fokussieren auf die bedeutsamen satellitengeodätischen Kompetenzen Planung (z. B. Erkundung, Ausarbeitung eines Beobachtungs-/Logistikplans (Abb. 153), Einarbeitung in Messkonzepte und -geräte), Messung und Auswertung (z. B. Integration der Ergebnisse in bestehende Festpunktfelder). In Abhängigkeit von der konkreten Aufgabengestaltung des Praktikums und der terminlichen Ausgestaltung ergaben sich unterschiedliche thematische Schwerpunkte (vgl. Tab. 12); bspw. wurden teilweise von Auftraggebern oder den betreuenden GIK-Mitarbeitenden Punkterkundungen übernommen. Im Rahmen der abschließenden Darstellung und Präsentation der Ergebnisse und des Prozesses in schriftlicher bzw. mündlicher Form besteht zudem Reflexionsraum für wechselseitige Rückmeldungen. Ein

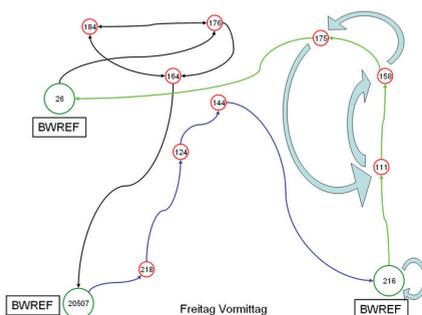


Abb. 153: Visuelle Darstellung des Beobachtungsplans eines Teams (2004).

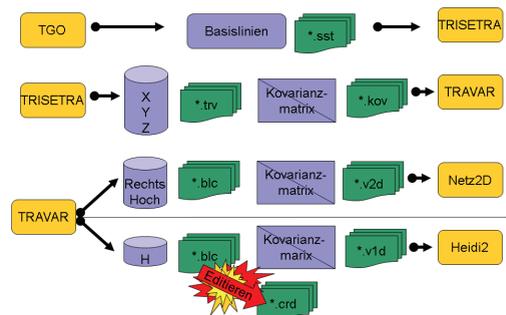


Abb. 154: Datenfluss einer GNSS-Auswertung für eine statische Netzmessung eines Teams (2004).

Tab. 13: Ablaufplan GNSS-Praktikum 2016.



beispielhafter Ablauf des GPS-/GNSS-Praktikum, dessen Vorbereitung häufig viele Monate vor dem ersten Hörsaal-Kontakt mit den Studierenden beginnt, ist in Tab. 13 dargestellt; es ist der Ablaufplan für das GNSS-Praktikum des Jahres 2016, das in Kooperation mit dem Referat 51 des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL) durchgeführt wurde.

Das GPS-/GNSS-Praktikum zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass in jedem Jahr eine neue und aktuelle Fragestellung bearbeitet wurde, die zudem hohen Praxisbezug aufwies (vgl. Tab. 12). Dies konnte insbesondere durch vertrauensvolle und partnerschaftliche Kooperationen sichergestellt werden, die über viele Jahre gepflegt und ausgeweitet wurden (vgl. Tab. 11). Gleichzeitig konnten Studierende hierdurch Kompetenz und Wirksamkeit erleben,

hatten Raum zur selbstbestimmten Ausgestaltung, wodurch Autonomie erlebt werden konnte, und waren zudem sozial eingebunden bzw. zugehörig. Diese, die Motivation betreffenden, positiven Aspekte (Deci und Ryan, 1993) sowie die Relevanz des Auftrags, mit dem die Studierenden i. d. R. von externen Auftraggebern betraut wurden, ermöglichten großartige Lern- und Lehrerfahrungen, bei denen die Betreuenden durch angepasste Rollenausgestaltung im Lernprozess insbesondere Rahmenbedingungen sicherstellten und die Studierenden individuell und partnerschaftlich begleiteten. In der Lehrveranstaltung "GPS-/GNSS-Praktikum" wird damit der sog. "Shift from Teaching to Learning" (Behrend, 1998) vollzogen, was Kompetenzorientierung und Studierendenzentrierung in einem anwendungsbezogenen, berufsfeldrelevanten Projektrahmen sicherstellt. In vielen Fällen wurden zudem praxisrelevante Forschungsfragen bearbeitet und so forschungsorientiertes Lernen (PEBA/KIT, 2014) ermöglicht.

3 Mess- und Auswertedesign

Während in den frühen Jahren des GPS-Praktikums – unter aktivem SA (Zumberge und Gendt, 2001) – insbesondere aufgrund von geringer Verfügbarkeit der GPS-Satelliten zielfdienliche Ergebnisse (z. B. mm-Genauigkeit) nur basierend auf umfassenden Planungen, langzeitstatischen, Signalabrisse minimierenden Messkonzepten und zeitintensiven Post-Processing-Auswertekonzepten sichergestellt werden konnten, fokussiert das GNSS-Praktikum heute verstärkt auf Echtzeitverfahren basierend auf Vernetzungsdiensten kontinuierlich betriebener Referenzstationen (z. B. *SAPOS*[®]; Riecken und Kurtenbach (2017)). Dieser Trend wurde erstmals sichtbar, als im Jahr 1997 die ersten beiden Baden-Württembergischen GPS-Referenzstationen in Betrieb genommen wurden. Es handelte sich dabei um die GPS-Permanentstation KARL (Messdach GIK) und die Station 0384 Stuttgart auf dem LGL-Dienstgebäude in Stuttgart (persönliche Kommunikation mit H-G. Dick, LGL). Darauf aufbauend wurden im Jahr 2003 (Dick und Derenbach, 2003; *SAPOS*[®]-BW, 2018) vernetzte *SAPOS*[®]-Produkte verfügbar.

Aktuelle GNSS-Datenverarbeitungen profitieren zudem von schnelleren Feldrechnern sowie mächtigen Verarbeitungsalgorithmen. Dies wurde im GNSS-Praktikum häufig genutzt, um Studierenden im Rahmen der Datenauswertung die Bearbeitung von individuellen Fragestellungen zu ermöglichen (z. B. Einfluss des minimalen Elevationswinkels, Einfluss des Operator Noise) und dadurch Theorie und Praxis verbindende Einblicke in die Variabilität der Ergebnisse (z. B. Koordinaten) zu gewinnen. Bei der Auswertung der gesammelten Daten kamen

und kommen aktuelle, marktrelevante kommerzielle Produkte zum Einsatz (z. B. Leica-SKI, Trimble GP-Survey, Leica-LGO).

Das Arbeitsparadigma, aktuelle Innovationen stets zeitnah in das GNSS-Praktikum zu integrieren, wurde in den letzten Jahren dazu genutzt, Studierende im Rahmen von Feldstudien mit dem großen Potenzial von absolutem PPP (Precise Point Positioning; Li u. a. (2015)) vergleichend zu konventionellen differenziellen Auswertekonzepten vertraut zu machen. Hier werden in Zukunft Einfrequenz- und PPP-RTK-Konzepte das GNSS-Praktikum thematisch erweitern.

Neben der Planung und der Umsetzung des Messkonzepts sowie der anschließenden Auswertung der GNSS-Daten kommt im GNSS-Praktikum der fundierten Analyse der Ergebnisse und deren Integration in bestehende Festpunktfelder eine zentrale Rolle zu. Während früher kaum 3D-Festpunkte verfügbar waren, die durch ausreichend genaue Lage- und Höheninformation zur Lagerung der Ingenieurnetze des GNSS-Praktikums beitragen konnten, leisten heute Geodätische Grundnetzpunkte oder virtuelle Referenzstationen umfassende Arbeitserleichterung (Feldmann-Westendorff u. a., 2016), wodurch bspw. umfangreiche nivellistische Höhenübertragungen zur Etablierung des kombinierten Lage- und Höhenbezugs weniger häufig notwendig werden. Zur Weiterverarbeitung der mit kommerziellen Softwareprodukten erzielten Sessionlösungen wurden am GIK eigene Programme mit höchstem statistischen Standard entwickelt und implementiert. Die Integration von GPS-Höhen in Landesnetze wurde bspw. von Illner (1995), Illner und Jäger (1995) und Jäger (1998) publiziert. Das Softwarepaket NETZ2D sowie das Konzept zur Integration von GPS in Verdichtungsnetze sind in (Oppen und Jäger, 1991; Illner und Jäger, 1993) dargelegt. Die Abb. 154 verdeutlicht graphisch den nachstehend beschriebenen Auswerteablauf:

- Zunächst wurden die binären Dateien aus LEICA/TRIMBLE in ASCII-Dateien zur Weiterverarbeitung in *travar* konvertiert. Die Ausgabedateien aus *skisetra* bzw. *trisetra* enthielten für jede Session 3D-Koordinaten (*.crd) und die zugehörige Kovarianzmatrix (*.cov).
- Die 3D- (*.crd) und (*.cov) wurden sodann mit *travar* nach Lage und Höhe aufgetrennt.
- Anschließend erfolgte der Sessionzusammenschluss nach Lage und Höhe mit *netz2d* bzw. *heidi1d*. Die freie Netzausgleichung hatte das Ziel, Messfehler zu entdecken und das nach der GPS-Auswertung zu optimistische Genauigkeitsniveau mittels Varianzkomponentenschätzung anzupassen. Anpassungsfaktoren von 3 - 10 waren dabei üblich (siehe Abb. 155).
- Abschließend erfolgte die Integration der kontrollierten Sessions in das Landesnetz. Hierbei wurden die stochastischen Anschlusspunkte statistisch kontrolliert (siehe Abb. 156).

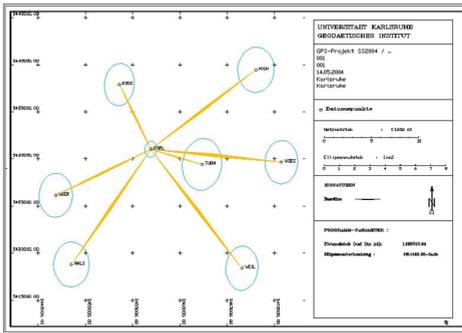


Abb. 155: Kontrollmessung eines BWREF-Teilnetzes für das LGL. Netzbild der freien Netzausgleichung. Fehlerellipsen weisen charakteristische Nord-Süd-Ausrichtung auf. Als Referenzstation wurde die Permanentstation KARL/GIK verwendet (2004).

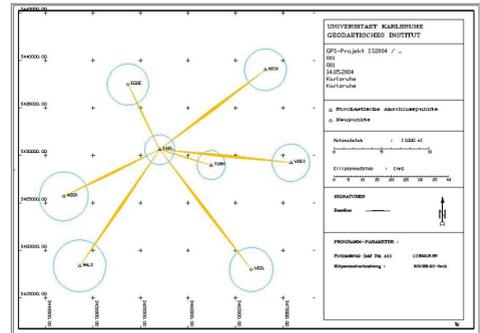


Abb. 156: Kontrollmessung eines BWREF-Teilnetzes für das LGL. Netzbild des stochastischen Netzanschlusses. Fehlerellipsen sind isotrop. Als Referenzstation wurde die Permanentstation KARL/GIK verwendet (2004).

In Kooperation mit COS Geoinformatik & Systemhaus wurde aus diesen sequenziell anzuwendenden Programmen, die zudem auch terrestrische Beobachtungen verarbeiten konnten, das kommerzielle, erfolgreiche und weitverbreitete Produkt NetzCG mit Bedienoberfläche entwickelt (Vetter, 2010), das weit verbreitet ist: NetzCG.

Auch in der Vorbereitung von Studierenden auf die BSc-Abschlussarbeit nimmt das GNSS-Praktikum eine wichtige Rolle ein, da eine umfangreiche Fragestellung – begleitet durch Betreuende – selbstständig bearbeitet wird. Gleichzeitig bietet das GNSS-Praktikum MSc-Studierenden die Möglichkeit, ihre im Studium erworbenen fachbezogenen und personalen Kompetenzen (z. B. Sozial-, Führungs-, Kommunikationskompetenz) durch hilfswissenschaftliche Tätigkeiten zu trainieren, zu verbessern und zu vertiefen (Mayer u. a., 2018).

4 Impressionen

Konkretisierende Einblicke in die sehr praxisnahen Elemente des GPS-/GNSS-Praktikums geben im Folgenden ohne Anspruch auf Vollständigkeit ausgewählte Dokumente. Die Bildunterschriften der Abb. 157 - 166 ermöglichen dabei u. a. die zeithistorische Zuordnung.



Abb. 157: Die Vorbereitung der GNSS-Empfänger umfasst die Kontrolle des internen Speichers und insbesondere die Konfiguration der Sessionparameter (Epochendauer, minimale Elevation). Oft waren knapp 10 Ausrüstungen im Einsatz (2012).



Abb. 158: Die präzise Bestimmung der Antennenhöhe stellt bei statischen GNSS-Messungen einen bedeutsamen Einflussfaktor dar, insbesondere wenn ein ausreichend langer Maßstab fehlt (2004).



Abb. 159: Situativ unterschiedliche Wahrnehmungen belegen die Realitätsnähe des GNSS-Praktikums 2013 auf der Friesenheimer Insel in Mannheim.



Abb. 160: NRTK GNSS-Messung im Jahr 2009 mit Topcon- und Leica-Ausrüstungen zur Einmessung des Fundaments eines InSAR-Corner-Reflektors. Der parallele Einsatz von zwei unterschiedlichen NRTK-Ausrüstungen unter gleichzeitiger Nutzung verschiedener Vernetzungsdienste (z. B. SAPOS[®], AXIONET) ermöglicht erhöhte Zuverlässigkeit und wissenschaftliche Studien.



Abb. 161: Wenn GNSS-Messungen im Juni durchgeführt werden sollen, können winterliche Witterungsbedingungen durchaus die Projekterkundung erschweren (Dez. 2009).



Abb. 162: Statische GPS-Messung auf dem Belchen im Jahr 2009 mit einem Trimble 4000SSI-Empfänger. Zur Sicherstellung der Stromversorgung wurden Autobatterien genutzt.

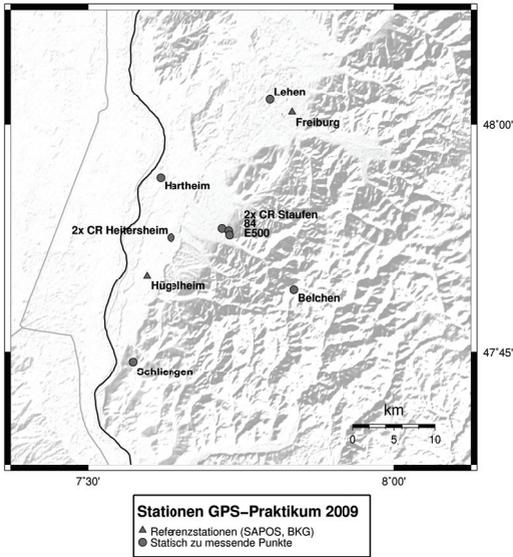


Abb. 163: Bei räumlich umfangreichen Messgebieten (z. B. Staufen i. Brsg. und Umgebung, 2009) kommt der Logistikplanung eine sehr große Bedeutung zu. Gleichzeitig können vorhandene GNSS-Permanentstationen einbezogen werden.

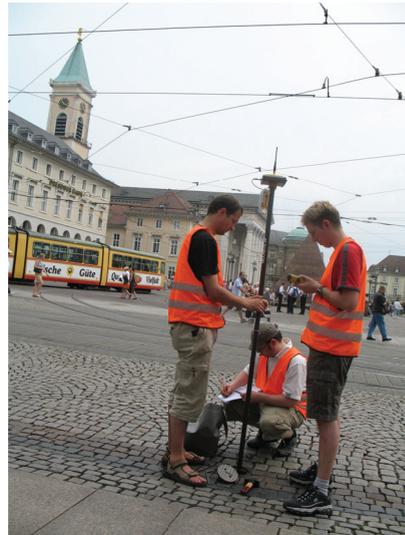


Abb. 164: GNSS-Punkterkundung für Echtzeitmessungen im belebten Stadtzentrum von Karlsruhe (2008).



Abb. 165: Während der Messkampagne im Jahr 2016 konnten die Untersuchungen des Einflusses einer weniger dichten SAPOS[®]-Vernetzung auch von extremen Wetterereignissen profitieren (Messlokation: Dobel).

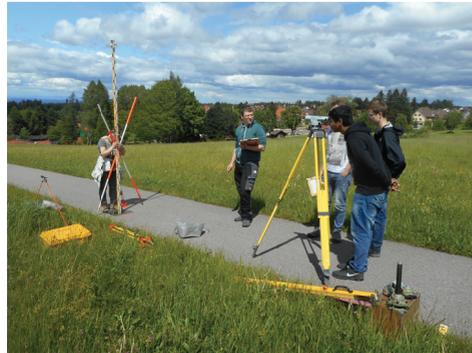


Abb. 166: Trotz moderner satellitengeodätischer Messtechnik sind grundlegende geodätische Fachkompetenzen (z. B. nivellitische Antennenhöhenbestimmung) bedeutsam (2016; Messlokation: Dobel).

5 Abschluss

Im Rahmen dieses Beitrags wurde die Entwicklung der aktuellen Lehrveranstaltung "GNSS-Praktikum" und ihrer Vorgänger dargestellt. Der kontinuierliche Veränderungsprozess dieser Lehrveranstaltung steht dabei stellvertretend für alle Lehrveranstaltungen der universitären Karlsruher Geodäsie-Studiengänge. Aktuell stellt das GNSS-Praktikum eine Querschnittslehreveranstaltung dar, in der sich Studierende insbesondere basierend auf Kompetenzen der Mathematischen und Physikalischen Geodäsie, der Vermessungskunde sowie der Geodätischen Datenanalyse satellitengeodätische Kompetenzen aneignen können, die wiederum auf den Lehrveranstaltungen "Positionsbestimmung mit GNSS" des zweiten BSc-Semesters und "Satellitengeodäsie" des fünften BSc-Semesters aufbauen. Dies geschieht in einem interdisziplinären Kontext, da bspw. häufig geodynamische Fragestellungen bearbeitet werden und zudem Studierende der Geophysik diese Lehrveranstaltung regelmäßig im Schwerpunktfach (Geophysik/KIT, 2018) belegen. Über die genannten fachlichen Kompetenzen hinaus zielt das GNSS-Praktikum in großem Maße ab auf die Handlungskompetenz der Studierenden, die als die Bereitschaft und Befähigung verstanden wird, sich z. B. in beruflichen und gesellschaftlichen Situationen zielführend zu verhalten (KMK, 2017). Das Trainingsangebot für Handlungskompetenzen kann im GNSS-Praktikum insbesondere deshalb sichergestellt werden, da Projektpartner spannende Fragestellungen an uns herantragen oder bereit sind, neue Fragestellungen mit uns gemeinsam zu entwickeln und diese partnerschaftlich zu begleiten.

Dank

An dieser Stelle bedanken wir uns sehr gerne bei

- allen Organisationen und Partnern, die sich bereit erklärt haben, unseren Studierenden eine praxisnahe und bedeutsame Aufgabe zu stellen;
- allen Organisationen und Partnern, die uns aktiv z. B. durch Messfahrzeuge oder Personal unterstützt haben;
- Geräteherstellern für das zur Verfügung stellen von Hard- und Software;
- Betreibern von Referenzdiensten;
- allen Studierenden (inkl. Wissenschaftlichen Hilfskräften), die mit großem Einsatz die Projekte erfolgreich mitgestaltet haben und sich an Messkampagnen beteiligt haben, die häufig an Wochenenden oder Brückentagen durchgeführt wurden;
- und abschließend bei allen ehemaligen GIKler*innen, die aktiv zum Gelingen der Lehrveranstaltung beigetragen haben.

Literatur

- Behrend, B. (1998): How to Support and Practise the Shift from Teaching to Learning through Academic Staff Development Programmes – Examples and Perspectives. In: *Higher Education in Europe*. Bd. 13. Bucharest: NESCO-CEPES.
- Bologna Working Group (2005): A framework for qualifications of the European higher education area. In: *Report on Qualifications Frameworks*. Danish Ministry of Science, Technology and Innovation. Copenhagen: Bologna Working Group.
- SAPoS[®]-BW (2018): Wichtige Ereignisse in der Historie von SAPoS[®]-Baden-Württemberg. URL: <http://www.sapos-bw.de/meilensteine.php> (besucht am 20.09.2018).
- Deci, E. und Ryan, R. (1993): Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik* 39:223–228.
- Dick, H.-G. und Derenbach, H. (2003): Ein Festpunktfeld wird aktiv – Aufbau und Betrieb von SAPoS[®] in Baden-Württemberg. In: *Mitteilungen, DVW Baden-Württemberg e.V. Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. Bd. 50. 2.
- Feldmann-Westendorff, U., Liebsch, G., Sacher, M., Müller, J., Jahn, C.-H., Klein, W., Liebig, A. und Westphal, K. (2016): Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 141(5):354–376. DOI: 10.12902/zfv-0140-2016.
- Geophysik/KIT (2018): Modulhandbuch Bachelor-Studiengang Geophysik. SPO 2015, Stand: Sommersemester 2018. URL: https://www.gpi.kit.edu/img/Stud_Bachelor/MHB_BScGph_SS18.pdf (besucht am 20.09.2018).
- GUG/KIT (2018): Modulhandbuch Bachelor-Studiengang Geodäsie und Geoinformatik. Version 2, SPO Version: 2015. URL: http://gug.bgu.kit.edu/downloads/GuG_Bachelor_Modulhandbuch_Mai_2018_Vers_2.pdf (besucht am 20.09.2018).
- HRK (2012): Kompetenzorientierung im Studium – Vom Konzept zur Praxis. Projekt nexus – Konzepte und gute Praxis für Studium und Lehre. nexus Impulse für die Praxis. Hochschulrektorenkonferenz Projekt nexus, Bonn.

- Illner, M. (1995): GPS-Integration nach Lage und Höhe. In: GPS-Leistungsbilanz '94. Beiträge zum 34. DVW-Seminar, 5.-7.10.1994 am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH). Schriftenreihe des DVW im Verlag Konrad Wittwer, S. 349–365.
- Illner, M. und Jäger, R. (1993): Ein Konzept zur Integration von GPS in Verdichtungsnetze – Modellbildung und Ableitung von zugehörigen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaßen. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)* 118(11):552–574.
- Illner, M. und Jäger, R. (1995): Integration von GPS-Höhen ins Landesnetze – Konzept und Realisierung im Programm HEIDI. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 102(1):1–17.
- Illner, M., Mayer, M. und Breunig, M. (2018): Die universitäre Geodäsieausbildung in Karlsruhe – Historie, Gegenwart und Zukunft. In: *Festschrift zur 150-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts*. Bd. 2018-2. Karlsruhe (KIT Scientific Publishing): Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, 275–290.
- Jäger, R. (1998): Ein Konzept zur selektiven Höhenbestimmung für SAPOS[®]. In: Beitrag zum 1. SAPOS[®]-Symposium, 11./12. Mai 1998, Hamburg. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.), Amt für Geoinformation und Vermessung, Hamburg, S. 131–142.
- Jonassen, D. (1999): Designing constructivist learning environments. In: *Instructional-Design theories and models. A new paradigm of instructional theory*. Hrsg. von C. Reigeluth. Bd. 2. Routledge, New York, London, S. 215–239.
- KMK (2017): Handreichung für die Erarbeitung von Rahmenlehrplänen der Kultusministerkonferenz für den berufsbezogenen Unterricht in der Berufsschule und ihre Abstimmung mit Ausbildungsordnungen des Bundes für anerkannte Ausbildungsberufe. Sekretariat der Kultusministerkonferenz Referat Berufliche Bildung, Weiterbildung und Sport. URL: http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2011/2011_09_23_GEP-Handreichung.pdf (besucht am 20.09.2018).
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J. und Schuh, H. (2015): Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy* 89(6):607–635. DOI: 10.1007/s00190-015-0802-8.
- Mayer, M., Haberkorn, C., Mann, S. und Wild-Pfeiffer, F. (2018): Kompetent in den höheren vermessungstechnischen Verwaltungsdienst – Ein akzentuierter Rückblick auf die wissenschaftliche Ausbildung am KIT. In: *(Schw)Ehre, wem (Schw)Ehre gebührt – Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernhard Heck*. Hrsg. von A. Heck, K. Seitz, T. Grombein, M. Mayer, J.-M. Stövhase, H. Sumaya, M. Wampach, M. Westerhaus, L. Dalheimer und P. Senger. Karlsruher Institut für Technologie: Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, S. 195–202. DOI: 10.5445/KSP/1000080236.
- OECD (2003): Definition and selection of competencies: theoretical and conceptual foundations (DeSeCo). Summary of the final report „Key Competencies for a Successful Life and a Well-Functioning Society“.
- Oppen, S. und Jäger, R. (1991): Das Softwarepaket NETZ2D. In: DVW Sonderheft "GPS und Integration von GPS in bestehende Netze", DVW-Landesverein Baden-Württemberg, Stuttgart, S. 190–209.
- PEBA/KIT (2014): Leitfaden: Forschungsorientierte Lehre – Begriffsverständnis und Umsetzungsmöglichkeiten am KIT. Personalentwicklung und Berufliche Ausbildung, Karlsruher Institut für Technologie. URL: https://www.ipek.kit.edu/downloads/Forschungsorientierte_Lehre.pdf (besucht am 20.09.2018).
- Riecken, J. und Kurtenbach, E. (2017): Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung – SAPOS[®]. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 142(5):293–300. DOI: 10.12902/zfv-0180-2017.
- Schaper, N. (2012): Fachgutachten zur Kompetenzorientierung in Studium und Lehre. HRK-Fachgutachten ausgearbeitet für die HRK von Niclas Schaper unter Mitwirkung von Oliver Reis und Johannes Wildt sowie Eva Horvath und Elena Bender. HRK-Projekt nexus. URL: https://www.hrk-nexus.de/fileadmin/redaktion/hrk-nexus/07-Downloads/07-02-Publikationen/fachgutachten_kompetenzorientierung.pdf.
- Vetter, M. (2010): Softwareentwicklung zur Ausgleichungsrechnung und Deformationsanalyse am Geodätischen Institut Karlsruhe. Hrsg. von K. Zippelt. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik / Karlsruher Institut für Technologie*, vol. 2010,3. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S. 279–290. ISBN: 978-3-86644-576-5. DOI: 10.5445/KSP/1000020074.
- Zumberge, J. und Gendt, G. (2001): The demise of selective availability and implications for the international GPS service. 26(6-8):637–644. DOI: 10.1016/S1464-1895(01)00113-2.

Das Studium Geodäsie und Geoinformatik aus studentischer Sicht

Fachschaft Geodäsie und Geoinformatik

Das Studium der Geodäsie und Geoinformatik (GuG) ist für die Studierenden sehr vielseitig. Das Bachelorstudium legt durch seinen Aufbau eine fundierte Grundlage in allen Bereichen der Geodäsie. Dazu zählen unter anderem die Ausgleichsrechnung, die Geoinformatik, die physikalische Geodäsie, die klassischen geodätischen Messverfahren sowie GNSS-Positionsbestimmung. Im anschließenden Masterstudium vertiefen die Studierenden diese Grundlagen in zwei von ihnen gewählten thematischen Schwerpunkten.

Hervorzuheben sind die offene Kommunikation und das gute Verhältnis der Studierenden zu den Dozenten. Durch diese lassen sich die Lehrveranstaltungen individuell an die jeweiligen Hörer anpassen und auch thematische Fragen lassen sich auf kurzem Wege klären.

Zu den Highlights im Studium gehören die Hauptvermessungsübungen im Schwarzwald. Bei diesen können die Studierenden ihr theoretisches Wissen in die Praxis umsetzen und führen verschiedenste geodätische Messaufgaben durch. Im frühen Bachelorstudium gilt es eine topografische Geländeaufnahme durchzuführen (Abb. 167) und im Masterstudium liegt der Fokus auf Talsperrenmonitoring.

Neben dem inhaltlichen Aspekt ist auch der soziale Aspekt nicht zu vernachlässigen, insbesondere für Studierende des zweiten Semesters. Wenn diese für zwei Wochen in den Schwarzwald fahren und in einer Selbstversorgerhütte zusammenleben, lernen sie sich noch besser und von anderer Seite kennen. Das sind wertvolle Erfahrungen sowohl für das gesamte Semester, als auch für die einzelnen Studierenden. Unter anderem die gemeinsamen Kochabende mit dem Ausklang am Lagerfeuer oder die Spieleabende sind wichtige Elemente der Gruppenentwicklung. Am letzten Abend der zweiwöchigen Hauptvermessungsübung findet ein Fußballturnier mit anschließendem Fest statt. Das Fußballturnier, bei dem jedes Semester und die Dozenten ein Team stellen, zeigt auch wiederum das gute Verhältnis zwischen den Studierenden und

den Dozenten. All diese Elemente machen die Hauptvermessungsübungen zu einem zentralen Element im Studium der Geodäsie und Geoinformatik am KIT.

Auch die Fachschaft Geodäsie und Geoinformatik ist ein wesentliches Element des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik und dient unter anderem als zentrale Anlaufstelle für die Studierenden bei Problemen jeglicher Art. Dabei profitieren alle von der geringen Größe des Studiengangs. Denn dadurch entsteht ein sehr gutes Verhältnis unter allen Studierenden, da sich die verschiedenen Semester auch untereinander gut kennen. Aus jedem Semester ist auch mindestens ein Studierender Mitglied in der Fachschaft, sodass alle Semester stets über die Abläufe und Aktionen der Fachschaft informiert sind. Zu den Aufgaben der Fachschaft gehört auch, dass diese die Studierenden in den verschiedensten Kommissionen vertritt und ihre Anliegen in diese mit einbringt. Dies geschieht immer mit dem Ziel, die Lehre im Studiengang zu verbessern. Das aktuelle Projekt der Fachschaft dient zur Erstellung eines *Leitbildes zu guter Lehre im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik*. In diesem hat die Fachschaft die Anforderungen an gute Lehre aus Sicht der Studierenden in einem Dokument zusammengefasst und an die Lehrenden publiziert.

Natürlich organisiert die Fachschaft auch Veranstaltungen für die Studierenden, welche unter anderem auch dazu gedacht sind, den Zusammenhalt und die Kommunikation unter den verschiedenen Semestern zu fördern. Regelmäßige Veranstaltungen sind das Sommerfest in Verbindung mit dem Nedo-Cup, sowie das Winterfest. Der Nedo-Cup ist ein Wettbewerb zwischen mehreren Teams die unterschiedliche Aufgaben mit geodätischem Bezug erledigen müssen (siehe Abb. 168). Teams können dabei von Studierenden sowie auch von Mitarbeitern des Geodätischen Instituts und des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung gebildet werden. Beim anschließenden Sommerfest lassen die Studierenden und Mitarbeiter der beiden



Abb. 167: Topografieaufnahme bei der HVÜ I.



Abb. 168: Nedo-Cup.



Abb. 169: Vermessung der archäologischen Grabung in Pergamon (Türkei).

Institute den Nedo-Cup bei Speis und Trank in Verbindung mit interessanten Gesprächen ausklingen.

Eine weitere Veranstaltung ist der sogenannte *Dia-Abend*. Bei diesem geben Studierende, die im Ausland waren, ihren Kommilitonen einen Einblick in ihre Erlebnisse des Auslandssemesters, des Praktikums oder der Abschlussarbeit. Dabei wird ein Projekt in Pergamon (siehe Abb. 169) oft thematisiert. Bei der bekannten archäologischen Grabungsstätte in Pergamon (Türkei) werden jährlich durch Studierende des Studiengangs GuG in einer vierwöchigen Messkampagne Vermessungen durchgeführt. Für Studierende, die an diesem Projekt teilnehmen, bietet sich auch die optimale Möglichkeit der Durchführung eines Messprojektes mit unterschiedlichen Anforderungen und die Anwendung des Gelernten in der Praxis.

Abschließend ist also festzuhalten, dass sich das Studium der Geodäsie und Geoinformatik am KIT sehr abwechslungsreich und unkompliziert gestaltet und die Studierenden zufrieden sind, hier zu studieren.

Das Museum des Geodätischen Instituts

Norbert Rösch

1 Einleitung

Zwei Einrichtungen des Geodätischen Instituts in Karlsruhe (GIK) spiegeln die 150-jährige Geschichte auf ganz besondere Weise wider. Dies ist zum einen die Bibliothek – diese wird in einem gesonderten Beitrag gewürdigt – und zum anderen das Museum. Beide stehen jeweils auf ihre Weise für den Wandel, den die Geodäsie als Wissenschaft im Laufe der Zeit durchlaufen hat.

Mit über 500 Exponaten aus dem Umfeld der Geodäsie bietet das Museum dem interessierten Vermesser einen detaillierten Überblick über das Instrumentarium der Vergangenheit. Neben den klassischen Geräten wie beispielsweise Theodolite und Tachymeter sind auch Rechenhilfen wie Rechenschieber und mechanische Rechenmaschinen vorhanden. Darüber hinaus gibt es auch Geräte aus dem Bereich der physikalischen Geodäsie wie beispielsweise Pendelapparate und Gravimeter.

Unter den Exponaten befinden sich sehr seltene Exemplare. Hier sind vor allem ein Marinechronometer (siehe Abb. 171) oder ein Quadrant von Canivet zu nennen. Darüber hinaus gibt es auch zumindest ein Unikat – es ist dies ein Basismessapparat nach Bessel. Ferner sind Instrumente vorhanden, die im deutschsprachigen Raum kaum oder gar nicht eingesetzt wurden. Das Tangententachymeter nach Sanguet, das dem GIK im Rahmen eines deutsch-französischen Projektes geschenkt wurde, sei dazu beispielhaft aufgeführt.

Im Folgenden soll die Einrichtung näher vorgestellt werden. In Zeiten knapper Ressourcen steht dabei natürlich auch der Nutzen zur Diskussion. Denn ein Museum ist kein Selbstzweck und unterliegt in seiner Nutzung dem Wandel der Zeit.

2 Das Museum

Ebenso wie der Bestand der Bibliothek setzen sich auch die Exponate des Museums im Wesentlichen aus Geräten zusammen, die für Ausbildungszwecke oder für die Bearbeitung von Projekten beschafft worden sind. Irgendwann genügten sie nicht mehr den geänderten Erfordernissen und wurden ausgemustert. Es ist das Verdienst von Dr. Wolfgang Zick, dass viele dieser Geräte nicht dauerhaft entsorgt wurden. Von jedem Typ nahm er mindestens ein Exemplar unter Verschluss, um es als Anschauungsmaterial aufzubewahren.

Entstanden ist das Museum im Jahre 1989, als die Räumlichkeiten der Erdbebenwarte aufgrund deren Auflösung einer neuen Bestimmung zugeführt werden konnten. Diese Gelegenheit nutzte Herr Dr. Zick und konzipierte gemeinsam mit dem damaligen Schreiner des GIK, Herrn Herbert Welker, auf den zur Verfügung stehenden etwa 50 m², das heutige Museum. In der institutseigenen Schreinerei wurden daraufhin passgenaue Schaukästen hergestellt, die mit den vorhandenen Geräten nach und nach bestückt wurden. Der gesamte Bestand wurde von Frau Kästel zwischenzeitlich in einer eigens dafür entwickelte Access-Datenbank erfasst. Neben den technischen Merkmalen ist für jedes Exemplar auch ein Foto gespeichert.

Einen Eindruck über das Aussehen dieser Vitrinen vermittelt Abb. 170. Auf der Abbildung ist in der Mitte oben eines der Paradestücke des Museums zu sehen. Es handelt sich dabei um einen Quadranten von Canivet aus dem 17. Jh. Leider ist das Stativ dieses Gerätes nicht



Abb. 170: Einige ausgewählte Vitrinen des Museums. Foto: Magda Kästel, GIK, 2018.



Abb. 171: Marinechronometer (1872).



Abb. 172: Repetitionstheodolit mit Versicherungsfernrohr (Reichenbach ca. 1823).

mehr erhalten. Deutlich zu erkennen sind auf der Abbildung die beiden Zielfernrohre, die die unmittelbare Beobachtung des Raumwinkels ermöglichen.

Nachdem bekannt wurde, dass das GIK ein derartiges Museum aufgebaut hat, konnte der Bestand durch Spenden von Firmen und Privatpersonen weiter ausgebaut werden. Die Kontakte kommen im Wesentlichen durch Alumni zustande, die als Motiv für ihre Aktivitäten die Verbundenheit mit ihrer Alma Mater angeben. Die letzten Geräte, die dem Museum übergeben wurden, stammten aus dem Schaukasten einer Baufirma und lassen sich auf den Zeitraum zwischen 1870 und 1900 datieren.

Aus fachlicher Sicht beherbergt das Museum Geräte, die man heute typischerweise der Geodäsie, der Geophysik und der Astronomie zuordnet. Entsprechend breit gestreut ist auch das Publikum, das sich für die Exponate interessiert. Die bislang ungewöhnlichste Gruppe waren vier Lehrer der Uhrmacherschule Furtwangen, die sich insbesondere für einen Marinechronometer (siehe Abb. 171) begeisterten. Nach Aussage dieser Experten handelt es sich dabei um ein sehr seltenes Exemplar, das bis zu diesem Zeitpunkt noch keiner der Experten im Original gesehen hatte.

Eine wesentliche Aktivität im Umfeld des Museums ist die Ausleihe. Auch wenn man die Dauerleihgaben nicht berücksichtigt, sind regelmäßig Geräte des Museums ausgeliehen und auf verschiedenen Sonderausstellungen zu sehen. Die bedeutendsten der jüngeren Vergangenheit waren:

- *Fließende Räume* (05.07. - 27.10.2017) im Generallandesarchiv in Karlsruhe
- *Pläne von solcher Accuratesse als noch keine vorhanden sind* (20.07. - 30.11.2014) im Emsland Moormuseum in Geeste
- *Vom Dreieck zur Karte. 150 Jahre Gradmessung in Sachsen* (23.04. - 14.11.2012) im Stadtarchiv in Dresden.

Regelmäßig werden auch Führungen durch das Museum angeboten. In einer etwa einstündigen Führung bekommen die Studierenden des ersten Semesters einen Einblick über die Ursprünge der geodätischen Instrumente und der damit verbundenen Methodik. So wird beispielsweise dargestellt, weshalb heute Theodolite oder Tachymeter kein Versickerungsfernrohr (siehe Abb. 172) mehr haben, während das im 19. Jh. geradezu ein Qualitätsmerkmal war. Oder es wird am Beispiel des Besselschen Basismessapparats der klassische Aufbau eines geodätischen Grundlagnetzes erläutert.

Neben diesen eher internen Führungen gibt es natürlich auch solche für externe Interessenten und Gäste des GIK. Begleitend zur INTERGEO 2009, die in Karlsruhe stattfand, wurden gleich mehrere Termine angeboten, um dem interessierten Fachpublikum die Gelegenheit zu geben, die Exponate zu besichtigen. Auch die Alumni, die es immer wieder an ihre ehemalige Ausbildungsstätte zieht, gehören zu den regelmäßigen Besuchern des Museums.

Auch für die Vorlesung "Geschichte der Geodäsie und des Deutschen Vermessungswesens" spielt das Museum naturgemäß eine bedeutende Rolle. Denn obwohl die Instrumente nicht gepflegt bzw. gewartet werden, sind viele von ihnen noch immer voll funktionstüchtig. Sie können daher in den zu obiger Veranstaltung angebotenen vorlesungsbegleitenden Übungen immer noch eingesetzt werden. Exponate des Museums, die schon oft eingesetzt wurden, sind beispielsweise:

- Das Tangententachymeter von Sanguet
- Wild TM 10 und Wild RDS bzw. Wild T16
- Abakus (in den Übungen in seiner japanischen Variante)
- Mechanische Rechenmaschinen (Curta, Alpina, Brunsviga).

Exemplarisch soll eine der Übungen ausgewählt und im Detail näher vorgestellt werden, um dem Leser deutlich zu machen, welche didaktische Absicht damit verbunden ist. Eine der Übungen, die praktisch in jedem Vorlesungszyklus der o. g. Veranstaltung durchgeführt wird, ist die Repetitionswinkelmessung. Sie wird gewöhnlich mit der indirekten Entfernungsmessung mit Hilfe einer horizontalen Basislatte und dem Theodolit Wild T16 verknüpft. Auf Basis dieses Messverfahrens wird aufgezeigt, wie durch die Methodik die Auswirkung der unzureichenden Ablesegenauigkeit am Teilkreis durch die Wiederholung der Messung mittels mechanischer Addition des Winkels vermindert werden kann. Wegen der Fehlerfortpflanzung ergibt sich durch die Anwendung der Repetitionswinkelmessung eine wesentlich höhere Genauigkeit für den abgeleiteten Winkel als bei der herkömmlichen Satzmessung.

Diese Vorgehensweise hat natürlich auch Nachteile. Durch die relativ lange Verweildauer auf einem Punkt kommen damit Effekte – z. B. die Pfeilerdrehung – ins Spiel, die man bei Anwendung der modernen Satzmessung vernachlässigen kann. Dieser Nachteil wiederum kann durch eine geräteseitige Erweiterung, nämlich durch ein Sicherungsfernrohr, kompensiert werden. An diesem Beispiel aus der Vermessungsgeschichte gewinnen die Studierenden tiefere Einblicke in die Wechselwirkung zwischen Methodik und Gerätetechnik.

Gerade im Hinblick auf die Ausbildung ist es interessant zu erwähnen, dass ehemals lebendiges Wissen und ehemals gängige Abläufe auch verloren gehen können. So gab es einige Geräte im Museum, über deren Funktion sich die Verantwortlichen nicht im Klaren waren. U. a. waren dies das Tangententachymeter nach Sanguet und die Sonnensche Rechengscheibe. Die Handhabung beider Geräte war nicht mehr bekannt. Es fand sich aber eine Studentin, die sich dieser Geräte annahm und durch Recherche in alten Fachzeitschriften die Verwendung der genannten Geräte offenlegte.

Das zuvor genannte Tangententachymeter wurde daraufhin näher untersucht und es wurde dazu sogar eine Publikation angefertigt, da die Funktionsweise dieses Gerätetyps im deutschsprachigen Raum nahezu unbekannt war. Auch für andere Publikationen wurden Geräte des Museums herangezogen. So beispielsweise auch eine Kippregel, um das Verfahren, wie es von Daniel Schwenter (1585 - 1638) vorgeschlagen wurde, untersuchen zu können. Diese Untersuchung fand im Rahmen der weiter oben schon genannten Vorlesung zur Geschichte der Geodäsie statt und wurde im Wesentlichen von Studierenden angefertigt.

Ein Museum ist natürlich immer auch ein Dokument der Zeitgeschichte, und die ausgestellten Gegenstände erzählen oftmals eine ganz eigene Geschichte. Eine besonders bemerkenswerte ist die der "Curta" (siehe Abb. 173), die als der erste Taschenrechner gilt. Am Reißbrett entworfen wurde die Rechenhilfe vom Feinmechaniker Kurt Herzstark, der die Idee zur Entwicklung



Abb. 173: Die Curta I und Curta II. Foto: Magda Kästel, GIK, 2018.

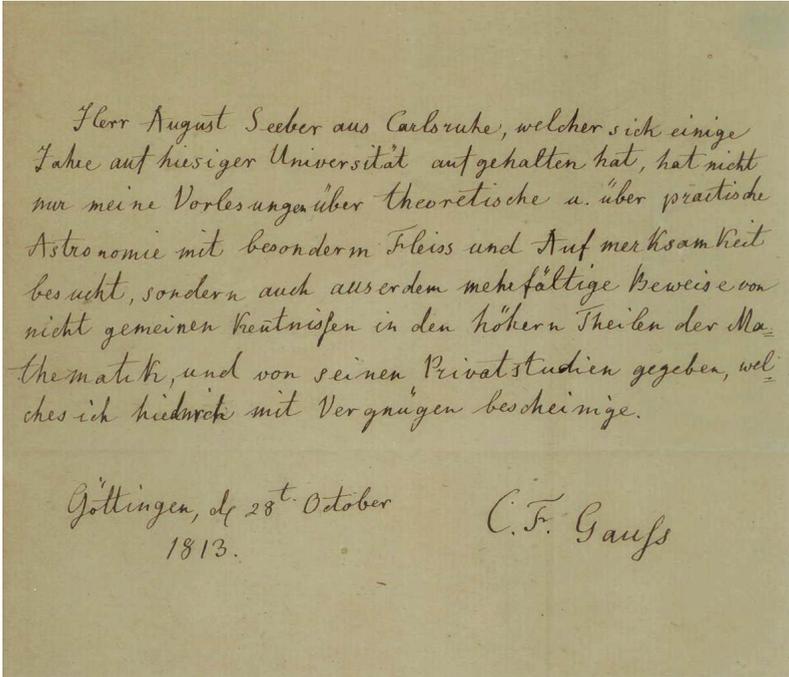
einer mechanischen Rechenmaschine bereits 1928 hatte. Neun Jahre später, nachdem die Arbeit weit genug fortgeschritten war, meldete er die ersten Patente an.

Mit der Machtergreifung der Nationalsozialisten verschlechterte sich allerdings das Geschäftsklima des Juden Herzstark zusehends. 1943 wurde er verhaftet und in das Konzentrationslager Buchenwald gebracht. Dort genoss er allerdings zahlreiche Privilegien – wenngleich man bei einer Internierung in einem derartigen Lager die Vokabel "Privileg" für zynisch halten kann –, vor allem aber durfte er an der Weiterentwicklung seiner Rechenmaschine arbeiten. Herzstark war klug genug, die Arbeiten an der Curta bis zu seiner Befreiung hinauszuzögern. Danach gründete er in Liechtenstein eine Firma und ging mit seiner Rechenhilfe in die Serienproduktion.

Am Ende der Ausführungen zum Museum sei noch auf zwei Prunkstücke verwiesen. Dies sind zum einen eine Originalschrift von Johann Georg von Soldner (1776 - 1833) und zum anderen eine von Carl Friedrich Gauß (1777 - 1855). Leider geht es bei der Handschrift von Gauß (siehe Abb. 174) nicht um einen seiner genialen mathematischen Beweise oder Herleitungen, sondern es handelt sich lediglich um ein Empfehlungsschreiben für einen Studenten. Dennoch ist dieses Papier ein hochgeschätztes Dokument des Museums. Übrigens, auch ohne weitergehende Kenntnisse im Lesen von Kurrentschrift kann das Schreiben sehr leicht entziffert werden.

3 Ausblick

Der Artikel zeigt, wie sich das Museum, im Laufe der Zeit entwickelt hat. Dabei wird darauf abgehoben, dass diese Einrichtung nicht dem Selbstzweck dient und von daher gilt es seine Existenz kritisch zu hinterfragen. Wie oben ausgeführt ist die Nutzung des Museums unbestritten. Es wird auch heute noch zur Unterstützung in der Ausbildung herangezogen und dient darüber hinaus auch der Öffentlichkeit zur Anschauung. Weiterhin ist auszuführen, dass eine derart hoch spezialisierte Einrichtung nahezu konkurrenzlos ist.

A photograph of a handwritten letter on aged, yellowish paper. The text is written in a cursive script. The main body of the letter is a paragraph praising August Seeber's lectures. Below the paragraph, the date and location are written on the left, and the signature 'C. F. Gauss' is on the right.

Herr August Seeber aus Carlsruhe, welcher sich einige Jahre auf hiesiger Universität aufgehalten hat, hat nicht nur meine Vorlesungen über theoretische a. über praktische Astronomie mit besonderm Fleiss und Aufmerksamkeit besucht, sondern auch ausserdem mehrfältige Beweise von nicht gemeinen Kenntnissen in den höhern Theilen der Mathematik, und von seinen Privatstudien gegeben, welches ich hiemit mit Vergnügen bescheinige.

Göttingen, d^e 28^t. October
1813.

C. F. Gauss

Abb. 174: Handschrift von C. F. Gauß (1777 - 1855). Foto: Magda Kästel, GIK, 2018.

Die Bibliothek des Geodätischen Instituts

Magda Kästel

„Trage heute Deine Bücher, damit sie morgen Dich tragen.“
(Äthiopisches Sprichwort)

150 Jahre Geodätisches Institut Karlsruhe sind der Anlass, den wir mit dieser Festschrift würdigen. Formal besteht die Bibliothek des Geodätischen Instituts (Abb. 175) noch nicht 150 Jahre. Das erste Inventarbuch beginnt im Jahr 1943. Aber es ist kaum vorstellbar, dass nicht schon vorher Bücher und andere Druckwerke im Besitz des Instituts vorhanden gewesen sein sollten. Forschung und Lehre ohne diese unverzichtbaren Hilfsmittel – undenkbar. Die ersten Inventarnummern gehören zu Büchern, die deutlich vor dem Jahr 1943 erschienen sind. Einige Bestände sind sogar schon vor der Einrichtung eines Geodätischen Instituts an der damaligen Polytechnischen Schule in Karlsruhe entstanden, ja selbst lange vor der Hochschule selbst.



Abb. 175: Die Studiengangsbibliothek. Foto: Magda Kästel, GIK, 2018.

Das älteste Lehrbuch stammt aus dem Jahr 1610! So ist die Entwicklung des Faches Geodäsie über mehrere Jahrhunderte hier dokumentiert. Die wichtigen deutschen Fachzeitschriften AVN und ZfV z. B. sind lückenlos seit dem ersten Jahrgang vorhanden, d. h. seit 1889 bzw. 1872. Kein Wunder, dass ein Besucher vom DGFI in Frankfurt diese Bibliothek einmal als „*wahre Schatzkammer*“ bezeichnete!

Aber wichtig für eine lebendige Bibliothek ist es auch, nicht nur die historischen Entwicklungen aufzuzeigen, sondern ebenso ihr Fortwirken in der Gegenwart, aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven für die Zukunft. Die schon erwähnten Fachzeitschriften sind exemplarisch für diese Tatsache, denn die aktuellen Hefte enthalten natürlich Artikel zu den neuesten Tendenzen, Fortschritten und Erkenntnissen. Und das sind nur zwei von insgesamt 125 Zeitschriftentiteln, von denen aktuell noch 16 fortgeführt werden. Die übrigen existieren heute entweder nicht mehr oder die Abonnements wurden gekündigt, oft – leider – aus finanziellen Gründen, aber auch, weil sich Schwerpunkte in der Forschungsarbeit des Instituts verlagert haben. Wie diese aussehen, kann man an anderer Stelle in dieser Festschrift erfahren.

Im Jahr 2000 erhielt die geodätische Bibliothek Zuwachs, sowohl räumlich wie in den Beständen, denn damals wurde die Büchersammlung des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) inventarisiert und in einem zusätzlichen Raum der Bibliothek eingegliedert. Etwas mehr als 5.000 Veröffentlichungen, Bücher, Zeitschriftenbände kamen so hinzu. Für manche der Bücher war es sozusagen eine Wiedervereinigung, denn das IPF ist ja einst aus dem GIK hervorgegangen. Der Erweiterung wurde Rechnung getragen, indem in der offiziellen Benennung aus der Institutsbibliothek eine Studiengangsbibliothek wurde. Auch die Datenbanken zur Verwaltung der Bibliotheksbestände wurden inzwischen zu einer gemeinsamen Datenbank zusammengeführt (was ganz einfach war, für das IPF war nämlich zur Erfassung bereits eine Kopie der von der geodätischen Bibliothek genutzten Datenbank zum Einsatz gekommen). Die Bibliothek des Geodätischen Instituts war eine der ersten Institutsbibliotheken der Universität Karlsruhe, deren Bestände so schon in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts digital erfasst wurden. Die Datenbank dient sowohl der Inventarisierung wie auch zur Verwaltung von Beschaffung und Ausleihe. Insgesamt stehen gegenwärtig mehr als 22.300 Titel in gedruckter Form den Nutzern zur Verfügung. Die meisten davon können ausgeliehen werden, für Bücher etc., die älter als hundert Jahre sind, gilt das allgemein übliche Ausleihverbot, sie können aber in den Bibliotheksräumen eingesehen werden.

Der Zugang zu den Informationsquellen im eigenen Haus ist ein großer Vorteil für die Nutzer; mal schnell ein Zitat verifizieren, kein Problem. Aber auch Beratung finden vor allem Studierende hier, wenn sie Literatur zu ihren Themen suchen, und das nicht nur in gedruckter Form.

So mancher verlässt die Bibliothek zwar nicht mit einem oder mehreren Büchern unterm Arm („*Trage heute Deine Bücher, ...*“), aber mit hilfreichen Hinweisen zu Fundstellen im Internet.

Medien ändern sich – von Tontafeln zu Papyrusrollen, von Pergamentcodices zu auf Papier gedruckten Büchern und digital gespeicherten Texten, aber Bibliotheken bleiben Anlaufstellen zur Informations- und Wissensvermittlung.

Die personelle Entwicklung am Geodätischen Institut

Lehrstuhlinhaber – Professoren

Jordan, Wilhelm	*01.03.1842	+17.04.1899	13.01.1868 - 31.12.1881
Haid, Matthäus	*28.02.1853	+05.11.1919	14.02.1882 - Mai 1917
Näbauer, Martin	*14.10.1879	+26.10.1950	01.10.1917 - 1926
Schlötzer, Adolf	*10.06.1884	+11.03.1963	1926 - 1952
Merkel, Heinrich (Geodäsie II)	*28.10.1889	+12.09.1965	1938 (27.7.44) - 1958
Lichte, Heinrich (Geodäsie I)	*08.04.1910	+31.12.1988	15.06.1953 (o. Prof. 24.8.56) bis 31.03.1978
Draheim, Heinz (Geodäsie II)	*05.11.1915	+25.04.2012	01.09.1959 (o. Prof. 21.11.60) bis 31.03.1984
Kuntz, Eugen (Astronomische und Elektronische Geodäsie)	*06.03.1925	+05.02.1998	27.10.1965 (o. Prof. 21.01.66) bis 30.09.1990
Mälzer, Hermann (Geodynamik)	*19.04.1925	+20.08.2018	01.07.1970 (Lehrstuhlvertretung Draheim; o. Prof. 01.04.79) bis 30.09.1979 01.10.1979 (o. Prof. 01.04.79) bis 30.09.1988
van Mierlo, Johannes (Geodäsie I)	*27.09.1935	+12.05.2015	01.04.1979 (o. Prof. 15.02.80) bis 30.09.2000
Schmitt, Günter (Mathematische und datenverarbeitende Geodäsie)	*26.10.1944		01.10.1979 (Lehrstuhlvertretung Draheim) bis 30.09.1983 01.01.1987 - 30.09.2010
Wenzel, Hans-Georg (Geodynamik)	*03.02.1945	+11.11.1999	01.10.1988 - 28.02.1999 (01.03.1999 Ruf nach Hannover)
Heck, Bernhard (Physikalische und Satellitengeodäsie)	*14.04.1951		01.06.1991 - 31.05.2018
Hennes, Maria (Vermessungskunde und Geodätische Sensorik)	*21.06.1960		seit 01.11.2000
Breunig, Martin (Geoinformatik)	*08.09.1961		seit 01.10.2010
Kutterer, Hansjörg (Geodätische Erdsystemwissenschaft)	*25.07.1965		seit 01.10.2018

Wissenschaftliche Beamte

Kuntz, E.	01.05.1961 - 21.01.1966	(s. weiter Professoren)
Mälzer, H.	01.03.1962 - 31.03.1979	(s. weiter Professoren)
Möller, D.	25.07.1962 - 30.09.1972	(nach Braunschweig)
Stahl, W.	03.12.1964 - 31.07.1989	
Schnädelbach, K.	16.11.1966 - 30.09.1971	(nach München)
Seckel, H.	01.02.1968 - 31.12.1999	
Maier, U.	08.08.1973 - 31.08.2003	
Schmitt, G.	01.04.1974 - 31.12.1986	(s. weiter Professoren)
Schlemmer, H.	19.06.1974 - 15.04.1990	(nach Darmstadt)
Illner, M.	seit 06.07.1990	
Zippelt, K.	01.09.1991 - 31.12.2016	
Rösch, N.	seit 01.10.1999	
Mayer, M.	18.12.2013 - 31.12.2016	seit 01.01.2017 KIT-Fakultät BGU

Wissenschaftliche Assistenten

Hofmann, K.	1841 - 1844
Pfeiffer	1844 - 1851
Steeb, E.	1847 - 1848
Fritschi, J.	1851 - 1876
Doll, M.	1859 - 1865
Pattenhausen, B.	1879 - 1880
Bürgin, J.	1894 - 1899
Schmitt, B.	1899 - 1901
Ehlgötz, H.	1901 - 1905
Krawinkel, W.	1902 - 1903
Schüttler, H.	1903 - 1904
Hoffman, W.	1904 - 1905
Bär, J.	1905 - 1909
Bub, A.	1909 - 1910
Binnig, K.	1911 - 1913
Kraft, A.	1910 - 1914
Merkel, H.	1913 - 1918
Herrmann, K.	1919 - 1922
Moser, P.	1922 - 1924
Lang, H.	1925 - 1928
Vieser, K.	1925 - 1928
Knäble, A.	1933 - 1934

Bodemüller, H.	1933 - 1935	
Dick, J.	1935	
Zehnder, E.	1935	
Horak, H.	1935 - 1937	
Walter, E.	1936	
Walter, B.	1936	
Müller, E.	1937	
Pfeifer, E.	1937 - 1938	
Girkens, J.	1938 - 1945	
Breunig, H.	1940 - 1945	
Stahl, H.	1946 - 1949	
Herminghaus, R.	1949 - 1951	
Eisenecker, H.	1949 - 1951	
Kopf, P.	1949	
Pffor	1950 - 1951	
Jäckel, S.	01.10.1951 - 30.09.1953	
Neubauer, G.	01.02.1951 - 30.04.1957	
Böser, W.	01.11.1951 - 29.02.1952	
	09.05.1955 - 30.06.1958	
Kuntz, E.	01.09.1951 - 31.05.1954	
	01.04.1957 - 31.03.1959	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Hahn, H.	1953	
Mälzer, H.	01.10.1953 - 31.12.1956	
	09.12.1960 - 28.02.1962	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Möller, D.	01.05.1954 - 31.12.1956	
	09.12.1960 - 25.07.1962	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Heidel, R.	01.02.1957 - 31.05.1959	
Bartcky, W.	15.05.1957 - 31.12.1958	
Busch, K. H.	01.07.1957 - 31.03.1961	
Steiner, B.	01.03.1958 - 31.03.1962	(Oberingenieur nach wenigen Monaten)
Wilkens, K.	01.06.1958 - 31.01.1960	
Stahl, W.	15.09.1958 - 03.12.1964	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Straub, G.	01.04.1959 - 31.12.1963	
Scherrer, O.	01.04.1959 - 30.04.1960	
Müller, Ph.	01.09.1959 - 30.11.1960	
Donié, M.	01.10.1959 - 31.01.1960	
Heiland, K.	11.12.1959 - 31.03.1960	
Farkas, T.	16.04.1959 - 31.12.1961	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Kemper, E.	01.01.1960 - 31.03.1962	

Böttcher, G.	01.02.1960 - 31.01.1961	
Gekeler, G.	01.04.1960 - 31.03.1962	
Lederle, W.	01.02.1962 - 01.03.1969	(ab 01.08.1968 Oberingenieur)
Schnädelbach, K.	01.03.1962 - 15.11.1966	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Weiser, G.	01.04.1962 - 31.10.1968	
Lautenbach, W.	16.05.1962 - 31.03.1967	
Oberholzer, G.	01.10.1963 - 01.05.1968	
Jürgens, H.	01.01.1964 - 31.10.1967	
Kohler, W.	01.03.1964 - 31.03.1969	
Schulz, G.	11.11.1965 - 14.04.1969	
Breuer, P.	09.12.1965 - 30.09.1969	(ab 01.08.1968 Oberingenieur)
Seckel, H.	09.12.1965 - 01.02.1968	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Stober, M.	11.11.1966 - 31.01.1967	
	01.05.1970 - 30.06.1976	
Zastrau, J.	01.02.1967 - 01.10.1971	
Thiele, P.	01.08.1967 - 31.03.1974	
Bozorgzadeh, G.	01.11.1967 - 28.02.1970	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Maier, U.	15.12.1967 - 08.08.1973	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Crusius, J.	01.05.1968 - 31.08.1971	
Caspary, W.	01.10.1968 - 31.10.1970	
Graeff, H.	01.10.1968 - 31.12.1968	
Mucke, J.	01.02.1969 - 30.09.1975	
Schlemmer, H.	01.04.1969 - 19.06.1974	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Schille, R.	01.09.1969 - 31.03.1970	
Keßler, W.	01.02.1970 - 31.03.1972	
Zick, W.	01.03.1970 - 31.03.1976	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Arnold, J.	01.04.1970 - 31.03.1976	
Felletschin, V.	01.11.1970 - 31.12.1976	
Kiesel, W.	01.08.1971 - 30.09.1977	
Kahmen, H.	01.07.1973 - 01.10.1978	
Trumpke, K.	01.11.1972 - 31.12.1978	
Graf, B.	01.10.1973 - 31.08.1974	
Heck, B.	01.09.1974 - 30.09.1980	(Hochschulassistent C 1)
	01.10.1980 - 30.09.1985	(s. weiter Professoren)
Illner, M.	01.04.1986 - 05.07.1990	(Hochschulassistent C 1)
		(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Jäger, R.	01.10.1990 - 31.08.1995	(Hochschulassistent C 1)
Kutterer, H.	01.10.1996 - 30.10.2000	(s. weiter Professoren)
Snitil, B.	01.06.2000 - 30.04.2007	(Hochschulassistent C 1)

Wissenschaftliche Angestellte

(ab 1976 Übergang vom bisherigen wissenschaftlichen Assistenten

zum wissenschaftlichen Angestellten auf Zeit)

Mayer, Paul	01.07.1960 - 31.01.1961	
Weber, Wigand	01.02.1961 - 31.08.1961	
Heitz, Edgar	14.09.1961 - 28.02.1962	
Farkas, Tibor	01.01.1962 - 30.04.1988	
Klein, Günter	01.03.1965 - 31.01.1966	
Schott, Peter	01.10.1966 - 30.09.2001	
Zick, Wolfgang	01.08.1966 - 28.02.1970	(s. weiter wissenschaftliche Assistenten)
	01.10.1977 - 30.09.2003	
Graeff, Hagen	01.07.1968 - 30.09.1968	(s. weiter wissenschaftliche Assistenten)
Däschner, Wolfgang	01.10.1969 - 31.03.1970	
Riedinger, G.	01.10.1969 - 31.03.1970	
Bozorgzadeh, Ghawam	01.03.1970 - 30.04.1977	
Schmitt, Günter	01.04.1970 - 04.01.1974	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Wieber, Fritz	01.01.1972 - 31.03.1972	
Huber, Wolfgang	01.06.1972 - 31.08.1972	
Diziol, Joachim	01.09.1972 - 31.03.1973	
Ihle, Wolfgang	01.10.1972 - 31.03.1973	
Lindner, Klaus	15.11.1974 - 31.08.2002	
Engler, Kurt	01.09.1976 - 31.03.1978	
Mönicke, Hans Joachim	01.04.1976 - 31.03.1981	
Meier Hirmer, Birgit	01.01.1977 - 31.12.2003	
Müller, Hartmut	01.09.1977 - 31.08.1982	
Heil, Ernst	01.04.1978 - 30.06.1983	
Bill, Ralf	15.04.1979 - 14.04.1984	
Ayan, Tefvik	15.06.1980 - 30.06.1982	
Göler von Ravensburg, Ingrid	01.07.1979 - 30.06.1984	(verh.: Illner)
Illner, Michael	01.07.1981 - 31.03.1986	(s. weiter wissenschaftliche Assistenten)
Staiger, Rudolf	01.01.1983 - 31.03.1988	
Jäger, Reiner	01.04.1983 - 31.03.1988	(s. weiter wissenschaftliche Mitarbeiter)
Kaltenbach, Hubert	01.11.1987 - 31.08.1992	
Fahlbusch, Thomas	01.05.1988 - 31.12.1991	
Müller, Tilman	01.02.1985 - 31.03.1990	
Klees, Roland	01.11.1986 - 30.06.1993	
Drixler, Erwin	01.07.1988 - 30.06.1993	
Klein, Ulrike	01.01.1990 - 30.09.1996	

Vetter, Martin	seit 01.07.1990	
Kutterer, Hansjörg	01.08.1990 - 30.04.1994	
Oppen, Silke	01.01.1991 - 31.12.1995	
Seitz, Kurt	13.03.1992 - 12.12.1996	
	seit 01.05.1998	
Binz, Ralf	01.07.1993 - 30.06.1995	
Rösch, Norbert	01.10.1993 - 30.09.1999	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Nkuite, Gabriel	01.01.1994 - 31.10.1998	
Kuhn, Michael	01.11.1994 - 31.07.1999	
Rawiel, Paul	01.12.1995 - 30.11.2000	
Kutterer, Hansjörg	01.10.1995 - 30.09.2000	
Lehmann, Rüdiger	01.04.1997 - 01.12.1997	
Mayer, Michael	01.11.1999 - 17.12.2013	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Westerhaus, Malte	seit 15.09.1999	
Kupferer, Stephan	01.07.2000 - 15.01.2006	
Depenthal, Claudia	01.01.2002 - 31.05.2010	
Eschelbach, Cornelia	07.10.2002 - 30.09.2009	
Wild, Franziska	01.01.2003 - 14.10.2007	
Juretzko, Manfred	seit 01.10.2003	
Richter, Eva	01.04.2005 - 21.03.2011	
Bähr, Hermann	16.10.2006 - 15.10.2012	
Schenk, Andreas	01.02.2008 - 31.08.2014	
Knöpfler, Andreas	01.05.2008 - 31.03.2015	
Herrmann, Christoph	15.03.2010 - 14.10.2016	
Naab, Christoph	seit 01.08.2010	
Grombein, Thomas	seit 01.08.2010	
Butwilowski, Edgar	01.10.2010 - 30.09.2016	
Kuper, Paul	seit 01.01.2011	
Ulrich, Thomas	01.09.2012 - 30.06.2017	
Kubanek, Julia	01.04.2014 - 31.03.2017	
Heck, Alexandra	seit 17.10.2016	
Laun, Simon	seit 01.05.2017	
Sumaya, Hael	seit 01.04.2017	
Falkenberg, Jana	seit 01.12.2017	
Mazroob Semnani, Nima	seit 01.05.2018	

Wissenschaftliche Mitarbeiter (aus Drittmitteln)

Zippelt, Karl	01.08.1976 - 31.07.1986	(s. weiter wissenschaftliche Beamte)
Müller, Hartmut	01.11.1982 - 31.10.1985	
Bill, Ralf	15.04.1984 - 14.04.1986	
Hahn, Michael	01.10.1984 - 30.06.1986	
Quasnitza, Hans	01.01.1985 - 31.03.1985	
Hartmann, Peter	15.06.1985 - 31.12.1990	
Fahlbusch, Thomas	01.07.1985 - 31.12.1987	
Haen, Walter	01.08.1986 - 31.10.1986	
Klees, Roland	01.09.1986 - 31.10.1986	
Kaltenbach, Hubert	01.01.1987 - 31.10.1987	
Hoppe, Helmut	01.11.1987 - 30.04.1989	
Jäger, Reiner	01.04.1988 - 30.09.1990	(s. weiter wissenschaftliche Assistenten)
Leismann, Martina	01.05.1987 - 31.03.1990	
Oppen, Silke	01.10.1990 - 31.12.1990	
Vogel, Manfred	01.02.1991 - 30.06.1995	
Schramm, Beate	01.05.1992 - 15.05.1993	
Rauhut, Peter	01.03.1991 - 30.06.1993	
Anurjew, Eugen	15.10.1991 - 14.10.1992	
	01.03.1993 - 28.02.1994	
Seitz, Kurt	13.12.1991 - 12.03.1992	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Polzer, Gudrun	01.11.1992 - 31.10.1996	
Nkuite, Gabriel	15.05.1993 - 31.12.1993	
Rauber, Wolfgang	15.03.1994 - 15.09.1994	
Kitter, Jessica	01.04.1994 - 30.09.1994	
Kutterer, Hansjörg	01.05.1994 - 30.09.1995	
Mayer, Michael	01.03.1996 - 31.10.1999	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Dinter, Georg	01.08.1996 - 30.12.2003	
Nutto, Michael	01.04.1999 - 31.03.2005	
Howind (Geb. Müller), Jochen	01.01.1997 - 30.05.2002	
Depenthal, Claudia	01.06.2000 - 31.12.2001	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Golovko, Daria	01.05.2011 - 31.07.2012	
Lemp, Dirk	15.05.1999 - 14.11.2000	
Schön, Steffen	01.02.2000 - 30.06.2002	
Schmidt, Ulrich	01.03.2000 - 30.04.2003	
Zimmermann, Jens	01.04.2000 - 31.05.2003	
Teusch, Annette	01.06.2000 - 30.04.2004	

Exß, Jan	01.04.2001 - 31.03.2003	
	01.01.2004 - 31.12.2004	
Borch, René	01.09.2001 - 31.08.2003	
Rozsa, Szabolcs	01.10.2001 - 31.03.2004	
Zimmermann, Jan	01.08.2003 - 28.02.2006	
Schmitt, Carolin	01.11.2003 - 30.06.2005	
Nuckelt, André	01.04.2004 - 31.12.2007	
Knöpfler, Andreas	01.04.2005 - 30.04.2008	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Dierks, Olaf	01.07.2005 - 30.06.2008	
Benner, Marco	27.03.2006 - 09.09.2010	
Lösler, Michael	01.02.2007 - 27.20.2009	
Luo, Xiaoguang	01.04.2007 - 28.02.2013	
Fuhrmann, Thomas	15.04.2010 - 30.06.2016	
Grombein, Thomas	01.01.2010 - 31.01.2016	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Ulrich, Thomas	01.09.2010 - 31.08.2015	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Paul, Norbert	01.10.2010 - 31.09.2013	
Kubaneck, Julia	01.04.2011 - 31.03.2014	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Bernhart, Franziska	15.01.2011 - 31.05.2013	
Menninghaus, Mathias	01.05.2011 - 31.12.2012	
Vatter, David	01.05.2011 - 30.09.2015	
Thomsen, Andreas	01.02.2013 - 31.10.2015	
Laun, Simon	01.07.2015 - 30.04.2017	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Wampach, Maryse	15.09.2015 - 28.02.2018	
Stövhase, Jan-Moritz	01.11.2016 - 31.08.2018	
Schroth, Eva	seit 01.01.2017	
Jahn, Markus	seit 01.05.2017	
Rabold, Jan	seit 01.09.2018	
Mazroob Semnani, Nima	01.01.2018 - 30.04.2018	(s. weiter wissenschaftliche Angestellte)
Peng, Yuan	seit 05.03.2018	
Even, Markus	seit 01.10.2018	

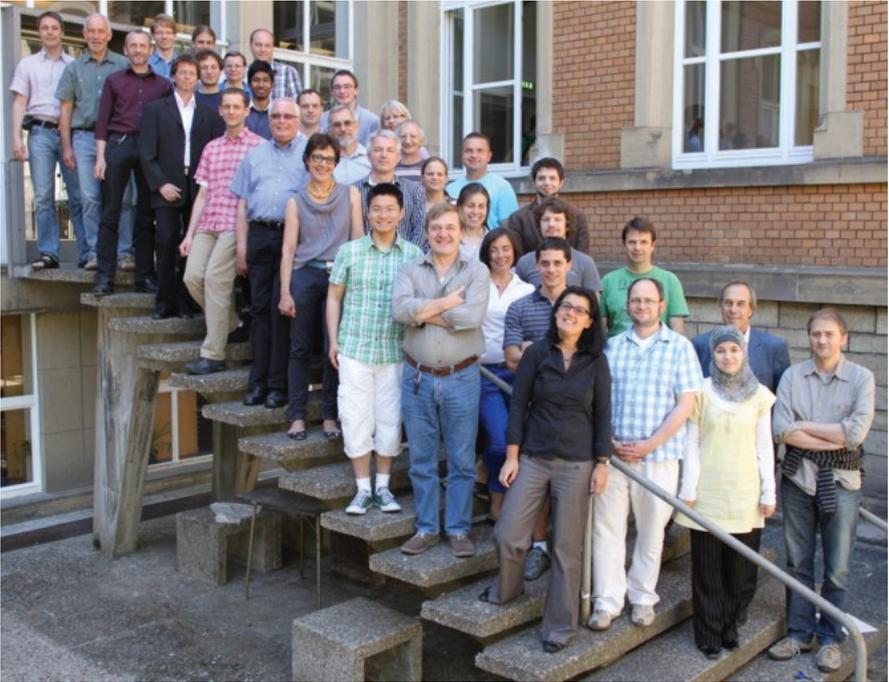


Abb. 176: Das Institutsteam im Jahr 2011.

Ehrungen und wichtige Ämter von Angehörigen des Geodätischen Instituts

Lichte, Heinrich

- 1972 - 1974 Vorsitzender der DGK bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
- 1973 Ehrenmitglied der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung

Draheim, Heinz

- 1968 - 1983 Rektor der Universität Karlsruhe
- 1970 - 1972 Präsident der "Fédération Internationale des Géomètres" (FIG)
- 1972 Ehrenmitglied der "Royal Institution of Chartered Surveyors", London
- 1973 Ehrendoktor (Dr. h. c.) der Technischen Universität Budapest
- 1974 Ehrenpräsident der FIG
- 1974 Ehrenmitglied des "Deutschen Vereins für Vermessungswesen"(DVW)
- 1981 Verdienstorden der Bundesrepublik Deutschland 1. Klasse
- 1982 Ehrenmedaille der Stadt Karlsruhe
- 1984 Verdienstmedaille des Landes Baden-Württemberg
- 1984 Ehrenkurator der Fachhochschule Karlsruhe

Mälzer, Hermann

- 12.05.1994 Vom Großherzog von Luxembourg zum Officier de l'Ordre Grand-Ducal de la Couronne de Chêne ernannt. (Ordenverleihung)

Schmitt, Günter

- 2000 Ehrendoktor (Dr. E. h.) der Technischen Universität für Bauwesen Bukarest

Zick, Wolfgang

- 2004 Ehrenmitgliedschaft der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung

Heck, Bernhard

- 2006 Ehrendoktor (Dr. h. c.) der Technischen Universität Budapest

Ehrendoktoren

1. In Anerkennung seiner hervorragenden Verdienste auf dem Gebiete der Geodäsie wurde auf einstimmigen Antrag der Fakultät für Bauwesen Herrn Professor Simon Bertschmann, von 1921 bis 1951 Leiter des Stadtvermessungsamtes Zürich und von 1951 bis 1958 Direktor der Eidgenössischen Landestopographie, die Würde eines Doktor Ingenieurs ehrenhalber (Dr.-Ing. E. h.) verliehen. (11.01.1950)
2. In Würdigung ihrer hervorragenden Arbeiten auf dem Gebiet der Erdmessung, besonders der astrogeodätischen Geoidbestimmung und deren befruchtende Auswirkungen auf die Forschungen des Geodätischen Instituts wurde auf einstimmigen Antrag der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen Frau Irene Fischer die Ehrendoktorwürde (Dr.-Ing. E. h.) verliehen. (09.07.1975)
3. In Würdigung seiner hervorragenden wissenschaftlichen Arbeiten auf dem Gebiet der rezenten Erdkrustenbewegungen, die für die geodätische Forschung im Oberrheingraben richtungsweisend sind, wurde auf einstimmigen Antrag der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen Herrn Charles A. Whitten die Ehrendoktorwürde (Dr.-Ing. E. h.) verliehen. (09.07.1975)
4. Die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe verleiht Herrn em. o. Professor Dr.-Ing. Rudolf Sigl in Anerkennung seiner herausragenden wissenschaftlichen Verdienste auf den Gebieten der Astronomischen, Physikalischen und Satelliten-Geodäsie die Würde eines Doktor-Ingenieurs ehrenhalber. (14.06.1995)
5. In Würdigung seiner hervorragenden wissenschaftlichen Arbeiten auf verschiedenen Teilgebieten der Geodäsie, seines hohen Ansehens in der internationalen und deutschen geodätischen Gemeinschaft sowie der Kooperation mit der hiesigen Fakultät in Lehre und Forschung wurde auf einstimmigen Antrag der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen Herrn Professor Dr. Péter Biro vom Geodätischen Institut der TU Budapest die Ehrendoktorwürde (Dr.-Ing. E. h.) verliehen. (13.02.2003)

Fakultätslehrpreis

2008	Mayer, Michael	Ausgewählte Kapitel zur Positionsbestimmung mit GNSS
2017	Geodäsie	Projekt "HVÜ"

Habilitationen mit Jahreszahl, Referent und Korreferenten

1. Merkel, H. Die geodätischen Arbeiten Christian Mayers in der Kurpfalz. Ein Beitrag zur Geschichte und Genauigkeit der Landesaufnahmen im 18. Jahrhundert.
1928 Schlötzer, Heiligenthal
2. Herrmann, K. Genauigkeit der polygonometrischen Punktbestimmung mit Berücksichtigung der Polarmethode.
1932 Schlötzer, Baldus
3. Bodemüller, H. Ellipsoidische Abbildungen von Rotationsellipsoiden mit Hilfe von Differentialformeln.
1949 Schlötzer, Reutter
4. Raab, K. O. Hypothesenfreie Bestimmung der physischen Erdoberfläche unter besonderer Berücksichtigung photogrammetrischer Methoden.
1951 Schlötzer, Merkel
5. Kuntz, E. Die analytischen Grundlagen perspektiver Abbildungen der Erdoberfläche aus großen Höhen – Ein Beitrag zur Auswertung von Satellitenaufnahmen.
1964 Draheim, Schwidewsky, Lichte
6. Schnädelbach, K. Berechnung geodätischer Linien durch konforme Abbildung des Ellipsoids auf die Kugel.
1971 Draheim, Kuntz
7. Schmitt, G. Zur Numerik der Gewichtsoptimierung in geodätischen Netzen.
1979 Kuntz, Grafarend
8. Heck, B. Zur Bestimmung vertikaler rezenter Erdkrustenbewegungen und zeitlicher Änderungen des Schwerefeldes aus wiederholten Schweremessungen und Nivellements.
1984 Mälzer, Kuntz, Martensen
9. Schlemmer, H. Zur digitalen Ablesung an Nivellierlatten.
1986 van Mierlo, Kuntz, Schnädelbach
10. Klees, R. Lösung des fixen geodätischen Randwertproblems mit Hilfe der Randelementmethode.
1993 Heck, Grafarend, Hackbusch
11. Kutterer, H. Zum Umgang mit Ungewissheit in der Geodäsie – Bausteine für eine neue Fehlertheorie.
2001 Heck, Schmitt, Näther

Dissertationen mit Jahreszahl der mündlichen Prüfung, Referent und Korreferenten

1. Werkmeister, P. Das württembergische Präzisionsnivellement.
1912 Haid, Engesser
2. Müller, H. Über den zweckmäßigsten Maßstab topographischer Karten.
Ihre Herstellung und Genauigkeit unter Berücksichtigung der
Verhältnisse und Bedürfnisse in Baden und Hessen.
1913 Haid, Engesser
3. Walther, P. Lagen- und Höhenaufnahmen bei technischen Erkundungsreisen
des Bauingenieurs in kartographisch unbekanntem Ländern.
1918 Näbauer, Rehbock
4. Schlüter, W. Beitrag zur Geschichte der Basisvergrößerung und
Vergrößerungsdreiecks.
1920 Näbauer, Baldus
5. Finsterwalder, R. Die Gnomonische Rezipokalprojektion und ihre praktische Anwendung
bei der Vermessung des Loferer Steinbergs.
1923 Näbauer, Baldus
6. Merkel, H. Über den Anschluß eines gegebenen sekundären Dreiecksnetzes
an ein erneuertes Hauptnetz durch maschenweise Übertragung der
trigonometrischen Punkte.
1924 Näbauer, Baldus
7. Idler, R. Die Theorie und die Genauigkeit des Scheibenrollplanimeters Nr. 4072
der Firma G. Conradi in Zürich.
1925 Näbauer, Baldus
8. Beck, F. Beitrag zur geschichtlichen Entwicklung des städtischen
Vermessungswesens in Deutschland.
1925 Näbauer, Höpfner
9. Martens, K. Die Mitarbeit des Vermessungsingenieurs an den Straßendurchbrüchen
im alten Hamburg.
1928 Schlötzer, Heiligenthal
10. Herrmann, K. Zur Fehlertheorie des zwischenorientierten Polygonzuges.
1929 Schlötzer, Baldus
11. Bodemüller, H. Über die konforme Abbildung der Erdoberfläche mit günstigster
Richtungs- und Längenreduktion für die Zwecke einer
Landesvermessung.
1934 Schlötzer, Wellstein

12. Raab, K. O. Beiträge zur Frage der Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit des stereophotogrammetrischen Aufnahmeverfahrens.
1935 Merkel, Wellstein
13. Müller, E. Beitrag zum maschenweisen Zusammenschluß trigonometrischer Netze.
1938 Merkel, Haack
14. Bardulis, P. Zur Geschichte und Konstruktion der Sonnenuhr.
1948 Merkel, Wolf
15. Münchbach, J. Der Höhenfehler großmaßstäblicher topographischer Karten.
1948 Schlötzer, Raab
16. Herminghaus, R. Über die Messung der Schwerkraft mit den bisher bekannten Gravimetern und über den Entwurf eines neuen Gravimeters mit horizontalen Quarzstäben.
1951 Schlötzer, Wolf
17. Neubauer, G. Über den Anwendungsbereich der Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate.
1956 Lichte, Merkel
18. Böser, W. Über die rationelle Fortführung topographischer Karten auf Grund von Luftbildaufnahmen.
1956 Merkel, Priv. Doz. Raab
19. Mälzer, H. Zur Ausgleichung von Nivellementsnetzen durch schrittweise Annäherung.
1956 Lichte, Merkel
20. Kuntz, E. Über den Zusammenschluß trigonometrischer Netze mit verschiedenen geodätischen Grundlagen.
1959 Merkel, Lichte
21. Steiner, B. Übertragungseigenschaften gleichseitiger Dreiecksketten mit Richtungs- und Längenmessungen.
1961 Draheim, Lichte
22. Möller, D. Beiträge zur barometrischen Höhenmessung.
1962 Lichte, Draheim
23. Hardy, R. L. Beiträge zur Entwicklung automatischer Nivellierinstrumente.
1963 Lichte, Draheim, Fadle
24. Busch, K. H. Prüfung von Aneroidbarometern.
1963 Lichte, Draheim
25. Straub, G. Breitenbestimmungen und Geoidstudien im Meridian des St. Gotthard.
1963 Draheim, Lichte
26. Schnädelbach, K. Simultane Ortsbestimmung durch Photographie der Sternbahnen.
1966 Kuntz, Draheim

27. Stahl, W. Der systematische Einfluß der Wetter- und Bodenverhältnisse auf die Refraktion bei optischer Distanzmessung mit vertikaler Latte.
1966 Lichte, Diem, Draheim
28. Oberholzer, G. Amtliche Fehlergrenzen des Katasters für die Neuvermessung von landwirtschaftlich genutzten Grundstücken.
1967 Wieser, Draheim
29. Schulz, G. Reduktion von Satellitenmeßbild mit Fixsternen.
1968 Kuntz, Schwidefsky
30. Lederle, W. Der instrumentelle Temperatureinfluß auf die Präzisionsmessung von Zenitdistanzen.
1968 Lichte, Draheim
31. Weiser, G. Die Prüfung von 2 m Basislatten.
1968 Lichte, Draheim
32. Breuer, P. Rundungsfehler bei direkter Auflösung geodätischer Gleichungssysteme.
1969 Draheim, Kuntz
33. Seckel, H. Zur geodätischen Erfassung von Inlandeisbewegungen.
1970 Lichte, Kuntz
34. Youssef, M. F. Ägyptens Beitrag zur Erdmessung.
1970 Lichte, Draheim, Mälzer
35. Kohler, W. Flurbereinigung und Dorferneuerung, dargestellt an der Beispieldorf-erneuerung Stebbach, ein Realteilungsgebiet Südwest-Deutschlands.
1971 Wieser, Draheim
36. Farkas, T. Bestimmung der magnetischen Deklination und deren Säkularänderung in Baden-Württemberg.
1972 Lichte, Kuntz, Mälzer
37. Schmitt, G. Speichertechnische und numerische Probleme bei der Auflösung großer geodätischer Normalgleichungssysteme.
1973 Mälzer, Kuntz
38. Schlemmer, H. Prüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit einem Interferenz-Komparator.
1974 Mälzer, Lichte
39. Arnold, J. Beitrag zur polynomialen Ausgleichung geodätischer Meßreihen.
1975 Kuntz, Hofmann, Mälzer
40. Zick, W. Geodätisch-astronomische Feldbeobachtung hoher Genauigkeit – Untersuchungen an den Verfahren von Zinger und Pewzow.
1976 Kuntz, Mälzer
41. Klein, A. Die geodätische Festlegung der Grenzen am Oberrhein (1750 - 1850).
1976 Draheim, Kuntz

42. Ayan, T. Astrogeodätische Geoidberechnung für das Gebiet der Türkei.
1976 Mälzer, Lichte
43. Bozorgzadeh, G. Die genaue Bestimmung von Lotabweichungen mit
dem Ni 2 Astrolabium.
1976 Kuntz, Schnädelbach
44. Maier, U. Genauigkeitsuntersuchungen zur elektrooptischen Messung
langer Strecken.
1976 Kuntz, Möller, Diem
45. Felletschin, V. Analyse und Steigerung der Genauigkeit bei elektronischen
Entfernungsmessungen mit Licht- und Mikrowellen im Testnetz
Karlsruhe.
1978 Kuntz, Möller, Höschele
46. Jürgens, H. Untersuchung und Neuberechnung der oldenburgischen
Katastertriangulation 1838 - 1846.
1978 Draheim, Lichte
47. Thiele, P. Berechnung gravimetrischer Lotabweichungen, dargestellt am Beispiel
Turmberg bei Karlsruhe.
1978 Lichte, Mälzer
48. Mucke, J. Numerische Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit verschiedener
Plattenreduktionsverfahren in der Satellitengeodäsie.
1978 Kuntz, Hofmann
49. Stober, M. Zur Erfassung rezenter vertikaler Krustenbewegungen durch
Präzisionsnivellements.
1978 Mälzer, Lichte
50. Trumpke, K. Simultane Ortsbestimmung durch Photographie von Fixsternen.
1979 Kuntz, Hofmann
51. Heck, B. Zur lokalen Geoidbestimmung aus terrestrischen Messungen
vertikaler Schweregradienten.
1979 Mälzer, Kuntz, Martensen
52. Mönicke, H. J. Interpretation astronomisch-geodätischer Lotabweichungen
im Oberrheingraben.
1981 Mälzer, Kuntz, Fuchs
53. Müller, H. Strenge Ausgleichung von Polygonnetzen unter
rechentechnischen Aspekten.
1982 Schmitt, van Mierlo
54. Bill, R. Eine Strategie zur Ausgleichung und Analyse von Verdichtungsnetzen.
1983 van Mierlo, Schmitt

55. Illner, I. Datumsfestlegung in freien Netzen.
1984 van Mierlo, Schmitt
56. Heil, E. Untersuchungen von Vertikal-Extensometermessungen im
Observatorium Schiltach.
1985 Mälzer, Wilhelm
57. Illner, M. Anlage und Optimierung von Verdichtungsnetzen.
1985 Schmitt, Grafarend
58. Zippelt, K. Modellbildung, Berechnungsstrategie und Beurteilung von
Vertikalbewegungen unter Verwendung von Präzisionsnivelements.
1988 Mälzer, van Mierlo
59. Staiger, R. Theoretische Untersuchungen zum Einsatz von Industriemeßsystemen.
1988 Schmitt, Schlemmer
60. Jäger, R. Analyse und Optimierung geodätischer Netze nach spektralen Kriterien
und mechanischen Analogien.
1988 Schmitt, van Mierlo, Vielsack
61. Müller, T. Integrierte Ausgleichung geodätischer Netze im Massenpunktmodell.
1990 Schmitt, Heck
62. Grüninger, W. Zur topographisch-isostatischen Reduktion der Schwere.
1990 Mälzer, Heck, Vielsack
63. Klees, R. Lösung des fixen geodätischen Randwertproblems mit Hilfe
der Randelementmethode.
1991 Mälzer, Heck, Wendland
64. Fahlbusch, T. Digitale Signalanalysen der Eigenbewegungen
von Nivellementvermarkungen.
1991 van Mierlo, Wenzel
65. Schweizer, R. Höhenänderungen von Nivellementpunkten im südlichen
Oberheingraben.
1991 Mälzer, Brauns, Czurda
66. Kaltenbach, H. Optimierung geodätischer Netze mit spektralen Zielfunktionen.
1992 Schmitt, van Mierlo
67. Drixler, E. Analyse von Form und Lage von Objekten im Raum.
1993 Schmitt, Schlemmer
68. Kutterer, H. Intervallmathematische Behandlung endlicher Unschärfen
linearer Ausgleichungsmodelle.
1993 Schmitt, Alefeld
69. Holewa, R. Historische Sondervmessungen an den schiffbaren Bereichen
des Rheins.
1993 Draheim, van Mierlo

70. Vogel, M. Analyse der GPS-Alpentravese. Ein Beitrag zur geodätischen Erfassung rezenter Erdkrustenbewegungen in den Ostalpen.
1994 van Mierlo, Heck
71. Klein, U. Analyse und Vergleich unterschiedlicher Modelle der dreidimensionalen Geodäsie.
1996 Heck, Schmitt
72. Seitz, K. Ellipsoidische und topographische Effekte im geodätischen Randwertproblem.
1997 Heck, Rummel (TU München), Wenzel
73. Rösch, N. Topologische Beziehungen im Geo-Informationssystem.
1998 van Mierlo, Bill (Uni Rostock)
74. Nkuite, G. Ausgleichung mit singulärer Varianzkovarianzmatrix am Beispiel der geometrischen Deformationsanalyse.
1998 Schmitt, van Mierlo
75. Musyoka, S. M. A Model for a Four Dimensional Integrated Regional Geodetic Network.
1999 Heck, Schmitt
76. Kuhn, M. Geoidbestimmung unter Verwendung verschiedener Dichtehypothesen.
1999 Heck, Ilk (Uni Bonn)
77. Rawiel, P. Dreidimensionale kinematische Modelle zur Analyse von Deformationen an Hängen.
2000 Schmitt, van Mierlo
78. Dinter, G. Generalisierte Orthogonalzerlegungen in der Ausgleichsrechnung.
2002 Schmitt, Alefeld
79. Schmidt, U. Objektorientierte Modellierung zur geodätischen Deformationsanalyse.
2003 Schmitt, Heck
80. Schön, S. Analyse und Optimierung geodätischer Messanordnungen unter besonderer Berücksichtigung des Intervallansatzes.
2003 Schmitt, Alefeld, Kutterer (Uni Hannover)
81. Zimmermann, J. Konzeption und Umsetzung eines Informationssystems zur geodätischen Deformationsanalyse.
2003 Schmitt, Stucky
82. Howind, J. Analyse des stochastischen Modells von GPS-Trägerbeobachtungen.
2004 Heck, Kutterer
83. Mayer, M. Modellbildung für die Auswertung von GPS-Messungen im Bereich der Antarktischen Halbinsel.
2005 Heck, Brunner (TU Graz)

84. Kupferer, S. Anwendung der Total-Least-Squares-Technik bei geodätischen Problemstellungen.
2005 Schmitt, Alefeld
85. Nutto, M. Internetbasiertes Fachinformationssystem zur Plattenkinematik.
2006 Schmitt, Stucky
86. Mürle, M. Aufbau eines Wertermittlungsinformationssystems.
2006 Schmitt, Kötter (Uni Bonn)
87. Wild-Pfeiffer, F. Auswirkungen topographisch-isostatischer Massen auf die Satellitengradiometrie.
2007 Heck, Grafarend (Uni Stuttgart)
88. Nuckelt, A. Dreidimensionale Plattenkinematik: Strainanalyse auf B-Spline-Approximationsflächen am Beispiel der Vrancea-Zone/Rumänien.
2007 Schmitt, Alefeld
89. Depenthal, C. Entwicklung eines zeitreferenzierten 4-D-Kalibrier- und Prüfsystems für kinematische optische Messsysteme.
2008 Hennes, Heck, Heister (UniBW München)
90. Eschelbach, C. Refraktionskorrekturbestimmung durch Modellierung des Impuls- und Wärmefflusses in der Rauigkeitsschicht.
2008 Hennes, Kottmeier
91. Luo, X. Extending the GPS Stochastic Model by Means of Signal Quality Measures and ARMA Processes.
2012 Heck, Kutterer (BKG)
92. König, D. Determining a terrestrial geodetic reference frame following the integrated approach of space geodesy.
2013 Heck, Rothacher (ETH Zürich)
93. Bähr, H. Orbital Effects in Spaceborn Synthetic Aperture Radar Interferometry.
2013 Schmitt, Hanssen (TU Delft)
94. González Martínez, F. GNSS clocks – Status and new opportunities for Satellite Navigation, brought by new atomic clocks into space.
2013 Heck, Hugentobler (TU München)
95. Schenk, A. PS-Interferometrie in urbanen Räumen – Optimierte Schätzung von Oberflächenbewegungen mittels Multi-SBAS-Verfahren.
2015 Heck, Hinz
96. Knöpfler, A. Korrektur stationsabhängiger Fehler bei GNSS.
2015 Heck, Becker (TU Darmstadt)

97. Herrmann, C. Entwicklung eines trackingfähigen optischen Messsystems zur Posenbestimmung.
2016 Hennes, Neumann (Uni Hannover)
98. Mink, M. Performance of Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) for Maritim Operations.
2016 Heck, Wendel
99. Naab, C. Beiträge zur Optimierung der Offsetkorrektion bei der taktilen Erfassung von Freiformflächen.
2016 Hennes, Heck, Jutzi
100. Ulrich, T. Uncertainty Modelling of High-precision Trajectories for Industrial Real-time Applications.
2016 Hennes, Schmitt, Wörn
101. Kubanek, J. Volcano Monitoring with Bistatic TanDEM-X SAR Interferometry.
2016 Heck, Moreira, Walter (Uni Potsdam)
102. Fuhrmann, T. Detection of Surface Displacements in the Upper Rhine Graben Area Derived from Geodetic Measurement Techniques (Levelling, InSAR, GNSS).
2016 Heck, Hinz, Hanssen (TU Delft)
103. Grombein, T. M. Gravity Forward Modeling with the Tesseroid-based Rock-Water-Ice Approach.
2016 Heck, Rummel (TU München)
104. Butwilowski, E. 3D Data and Model Management for the Geosciences with Particular Emphasis on Topology and Time.
2015 Breunig, Al Doori (American University Dubai)
105. Kuper, P. V. Spatio-Temporal Data Handling for Generic Mobile Geoinformation Systems.
2016 Breunig, Al Doori (American University Dubai)
106. Kermarrec, G. Stochastic Modelling of GNSS Phase Observations – A Proposal to Model Correlations and its Impact on the Positioning Solution.
2017 Heck, Wanninger (TU Dresden)

Auslandsarbeiten und Forschungsaufenthalte

- 1954 Liberia (Lichte)
wasserwirtschaftliche Vermessungen
- 1959 Ägypten (Lichte, Stahl)
Pipeline Trassierungen im Nildelta
- 1959 Grönland/Internationale Glaziologische Grönlandexpedition (EGIG)
(Mälzer, Möller, Pfrommer, Schnädelbach)
Motorisiertes Nivellement
- 1961/62 Äthiopien/Gilgel Abbay (Mälzer, Möller, Lichte, Straub, Stahl)
Barometrische und trigonometrische Höhenmessung zur Kartenherstellung
Baha Dar (Farkas, Steiner)
Tachymetrische Aufnahme
- 1966 Griechenland/Theben (Zick)
Archäologische Vermessungskarte (01.05. - 30.06.1966)
- 1968 Grönland/EGIG (Seckel, Stober, Thiele, Zick)
Wiederholungsnivellement (11.04. - 24.08.1968)
- 1968 Äthiopien (Thiele)
Barometrische Höhenmessung für gravimetrische Geländepunkte
- 1970 Oman (Zick)
Paßpunktbestimmung (11.04. - 03.06.1970)
- 1971 Grönland (Zick)
Eisbewegungsmessungen (09.07. - 11.08.1971)
- 1972 Kanada/Pond Inlet (Thiele, Zick)
Meereisbewegung, Refraktionsbestimmungen (07.05. - 29.06.1972)
- 1974 Grönland (Stober)
Ausmessen von Deformationsfiguren, Studien zur Refraktion,
Aufstocken der Balisen des EGIG Profils (Juli 1974)
- 1974 Nepal (Schmitt)
Grundlagenvermessung im Rahmen der Stadtsanierung Bhaktapur (22.01. - 20.03.1974)
- 1976 Irak/Bagdad, Basra (Zick)
Autobahnabsteckung, Paßpunktbestimmung (12.02. - 15.04.1976)
- 1979 Türkei/Lidar (Zick)
Archäologische Vermessungen, Karte (10.08. - 15.09.1979)
- 1979/80 Antarktis/McMurdo, Dome C (Zick)
Absteckung geophysikalischer Profile, Refraktionsstudien,
astronomische Messungen (10.11.1979 - 20.01.1980)

- 1981 Italien/Castel Gandolfo (Zick)
Archäologische Vermessung (02.05. - 02.06.1981)
- 1981 Türkei/ Ergani, Lidar (Zick, Bill)
Archäologische Vermessung, Karte (29.08. - 15.10.1981)
- 1981 - 88 TU Delft, Faculteit der Geodesie (B. Heck)
Forschungsaufenthalt (September-Oktober 1981, Juni-August 1988)
- 1981/82 Antarktis/Georg von Neumayer Station und Filcher Station (Lindner)
Eisdeformationsmessungen, Dopplermessungen (15.12.1981 - 15.03.1982)
Georg von Neumayer Station (Otto)
Einrichtung des geophysikalischen Observatoriums
- 1982 Italien/Rom (Bill)
Archäologische Vermessung: Sonnenuhr des Augustus
- 1984 Antarktis/King George Island (Zick)
Paßpunktbestimmung, Solifluktmessungen,
Astronomische Beobachtungen (10.01. - 23.02.1984)
- 1984 Jordanien (Zippelt)
Einmessung von sprengseismischen Profilen (20.04. - 26.05.1984)
- 1984 Italien/Rom (Staiger)
Archäologische Vermessungen (Forum Romanum) (01. - 15.07.1984)
- 1984 Rumänien/Snagov (Illner, Kuntz, Seckel, Zick)
Präzisionsstrecken und Höhenmessung im Geodynamischen Testfeld Caldarusani
(22.09. - 06.10.1984)
- 1984/85 Antarktis/Borgmassiv (Staiger)
Paßpunktbestimmungen (Dezember 1984 - März 1985)
- 1986 Ungarn/Budapest (Heck, Seckel)
Eichstreckenmessung mit Mekometer (1 Woche 06.1986)
- 1986 Rumänien/Karpaten (Jäger, Schmitt)
Messungen im Geodynamischen Testfeld mit dem ISPH Bukarest (August/September 1986)
- 1986 Rumänien/Snagov (Seckel, Staiger, Zick)
s. o. (24.08. - 07.09.1986)
- 1986/87 Antarktis (Lindner)
Georg von Neumayer Station (17.12.1986 - 20.03.1987)
- 1987 Italien/Caneva (Schmitt)
Deformationsmessungen (RCM) (1 Woche 04.1987)
- 1987 Rumänien/Karpaten (Jäger, Schmitt)
Messungen im Geodynamischen Testfeld mit dem ISPH Bukarest (Okt. 1988)

- 1988 Italien/Caneva (Kaltenbach, Welker)
Deformationsnetz (RCM) (08. - 14.05.1988)
- 1988 Ungarn/Budapest (Seckel, Ratzel)
Eichstreckenmessung mit Mekometer in Soskut, Gödöllö (05. - 12.06.1988)
- 1988 Kanada/Arktis (Zick)
Paßpunktbestimmungen und topographische Aufnahmen mit Geographen in Ellesmere Island, Axel Heiberg Island, Ward Hunt Island (26.06. - 28.07.1988)
- 1988 Brasilien/Curitiba (Schlemmer)
Einrichtung eines Feinmeßlabors (Juli 1988)
- 1988 Rumänien/Karpaten (Jäger, Schmitt)
Messungen im Geodynamischen Testfeld mit dem ISPH Bukarest (03. - 18.08.1988)
- 1988 Luxembourg/Luxemburg (Seckel)
Eichstreckenmessung mit Mekometer (05.12.1988)
- 1989 Rumänien/Snagov (Drixler, Kuntz, Seckel, Ratzel, Zick)
Präzisionsstrecken- und Höhenmessung im Geodynamischen Testfeld Caldarusani (30.03. - 17.04.1989)
- 1989 Italien/Gemona, Caneva (Jäger, Schmitt)
Deformationsnetze (10. - 17.04.1989)
- 1989 Grönland (Illner)
GPS-Messungen EGIG Profil (19.05. - 07.08.1989)
- 1989 Ohio State University, Columbus/Ohio, USA. Department of Geodetic Science and Surveying (B. Heck)
Forschungsaufenthalt (August-November 1989)
- 1990 Italien/Rom (Zick)
Mars Ultor Tempel, Forum Romanum, Präzisionslotungen (21. - 26.02.1990)
- 1990 Italien/Gemona, Caneva, Udine (Jäger, Schmitt)
Deformationsnetze, Recent Crustal Movements. Kooperation München-Udine-Stuttgart-Karlsruhe (25.03. - 01.04.1990)
- 1990 Israel/Kfar Hamasi (Fahlbusch)
Deformationsnetze, Recent Crustal Movements.
Kooperation Survey of Israel/Tel Aviv-Karlsruhe-Hannover (Mai 1990)
- 1990 Grönland (Drixler)
GPS-Messungen EGIG-Profil (18.05. - 03.08.1990)
- 1990 Italien/Gemona, Caneva, Udine (Jäger)
Deformationsnetze, Recent Crustal Movements.
Kooperation München-Udine-Stuttgart-Karlsruhe (29. - 30.05.1990)

- 1990 Spitzbergen (Hartmann)
Geowissenschaftliche Spitzbergen-Expedition (20.06. - 01.09.1990)
- 1990 Rumänien (Schmitt, Jäger)
Testfeld Caldarusani (Aug./Sept. 1990)
- 1990 Italien/Castel del Monte (Klein, Vogel, 16.09. - 25.10.1990)
(Zick, 16. - 23.04.1990, 19. - 29.09.1990)
Grundlagenvermessung für Bauaufnahme
- 1990 Türkei/ Didyma (Kutterer)
Grabungsnetz, Bauaufnahme (08.08. - 08.09.1990)
- 1990/91 University of Nairobi, Kenia. Department of Surveying and Photogrammetry (Schmitt)
Gastprofessur (DAAD) (16.12.1990 - 31.03.1991)
- 1991 Italien/Friaul (Oppen, Rauhut, Vogel u. a.)
GPS-Rahmennetzmessung (01. - 07.04.1991)
- 1991 Italien/Castel del Monte (Zick)
(02. - 10.04.1991)
- 1991 Italien/Caneva, Gemona (Jäger, Oppen)
Mekometermessungen (22. - 26.04.1991)
- 1991 Italien/Österreich/Schweiz/BRD (Oppen, Rauhut, Vogel, Vetter, u. a.)
Alpentravese, GPS-Messungen (26.05. - 08.06.1991)
- 1991 Israel/Kefar Hanasi (Fahlbusch)
Messung eines EDM Netzes im Rahmen der Zusammenarbeit GIF
(German Israel Foundation for Research and Development) (08. - 23.05.1991)
- 1991 Ungarn (Kuntz, Seckel)
Streckenmessungen im Testnetz Gödölö (17. - 21.06.1991)
- 1991 Italien/Castel del Monte (Klein, Zick)
(14.09. - 05.10.1991)
- 1992 Italien/Caneva (Jäger, Oppen)
Mekometermessungen (12. - 16.04.1992)
- 1992 Israel/Kefar Hanasi (Vogel)
Messung eines EDM Netzes im Rahmen der Zusammenarbeit GIF
(German Israel Foundation for Research and Development) (10. - 21.05.93)
- 1992 Italien/Österreich/Schweiz/BRD (Oppen, Rauhut, Vogel, Vetter, u. a.)
Alpentravese, GPS-Messungen (24.08. - 04.09.1992)
- 1992 Türkei/Göllüdag, Kappadokien (Zick, 29.08. - 27.09.1992, Schilling, 29.08. - 03.10.1992)
Topographische Aufnahme mit Institut für Baugeschichte
- 1992 Italien/Rom, Villa Hadriana (Kutterer, Lenk)
(27.09. - 10.10.1992)

- 1992 China/Dafosi (Vogel)
Vermessung einer Buddhastatue (27.09. - 25.10.1992)
- 1993 Italien/Caneva, Gemona (Illner, Oppen)
Mekometermessungen (17. - 21.05.93)
- 1993 Italien/Friaul
GPS-Rahmennetzmessung (23. - 28.05.1993)
- 1994 Italien/Caneva, Gemona (Illner, Oppen)
Mekometermessungen (22. - 26.04.1991)
- 1994 Spitzbergen (Vetter, mit Göttinger Geographen)
(21.07. - 10.09.1994)
- 1994/95 University of New South Wales, Sydney/Australien.
School of Geomatic Engineering (Schmitt)
Forschungssemester (15.08.1994 - 15.01.1995)
- 1994 Teilnehmer an der Alpentravese '94
(Binz, Illner, Kitter, Kutterer, Lindner, Oppen, Rauber, Rösch, Vogel, Zick)
(28.08. - 03.09.1994)
- 1994/95 Cuiabá/Brasilien (Rawiel)
Projekt Ökologie des Pantanal von Mato Grosso
Aufbau der Infrastruktur zur Satellitenbildauswertung (04.1994 - 07.1995)
- 1994 Karpaten/Rumänien (Vetter, Jäger)
- 1995 Karpaten/Rumänien (Vetter, Binz)
- 1995 Antarktis/Antarkische Halbinsel (Kutterer: Fossil Bluff, Alexander Island),
(Lindner: Rothera, Adelaide Island), (Oppen: Gibbs Island bei Elephant Island)
German Antarctic Project 1995 (02.01. - 07.03.1995)
- 1996 Sydney/Australien (Nkuite)
Programmentwicklung (19.08. - 19.09.1996)
- 1996 Bandung/Indonesien (Nkuite)
Programmentwicklung (19. - 30.09.1996)
- 1996 Göllüdag/Türkei (Zick)
(10.08. - 11.09.1996)
- 1996 Castel del Monte/Italien (Zick, mit Prof. Schirmer, KA)
(12. - 17.09.1996)
- 1996 TU Budapest, Hungary (B. Heck)
Gastprofessur (September-Oktober 1996)
- 1997 Sydney/Australien (Nkuite)
Programmentwicklung (13. - 27.10.1997)

- 1997 Budapest/Soskut/Ungarn (Kuhn, Haug)
GPS-Messungen im Deformationsnetz Soskut (20. - 24.10.1997)
- 1997 Karpaten/Rumänien (Dinter, Zick, Weindorf)
GPS-Kampagne, Starkbeben SFB 461 (23.09. - 04.10.1997)
- 1997 Brasilien (Rawiel)
Gutachter für die GTZ im Projekt: KV-Demarkierung von Indianergebieten in Amazonien (25.08. - 30.09.1997)
- 1998 Antarktis (Mayer: O'Higgins, AH Chile), (Kutterer: Fossil Bluff, Alexander Island), (Lindner: Rothera, Adelaide Island)
GPS-Kampagne: Referenznetz Antarktis 2 (04.01. - 28.02.1998)
- 1998 Brasilien (Rawiel)
Gutachter für die GTZ im Projekt: KV-Demarkierung von Indianergebieten in Amazonien (03. - 19.08.1998)
- 1998 Karpaten/Rumänien (Dinter)
GPS-Kampagne, Starkbeben SFB 461 (15. - 30.08.1998)
- 1999 Tansania/Kilimanjaro (Illner)
GPS-Höhenbestimmung (15.09. - 05.10.1999)
- 1999 Budapest, Soskut/Ungarn (Seitz)
GPS-Messungen im Deformationsnetz Soskut (06. - 10.10.1999)
- 2000 Budapest, Soskut/Ungarn (Seitz)
GPS-Messungen im Deformationsnetz Soskut (08. - 12.05.2000)
- 2000 Karpaten/Rumänien (Dinter, Nutto)
GPS-Kampagne, Starkbeben SFB 461 (14. - 31.08.2000)
- 2001 University of Calgary, Canada. Department of Geomatics Engineering (B. Heck)
Forschungsaufenthalt (April-Juli 2001)
- 2002 Antarktis
(Borch; Station Jubany/Dallmann/Argentinien, 04.01. - 22.02.2002)
(Depenthal; Station Vernadsky/Russland, 13.01. - 26.02.2002)
- 2003 Budapest, Soskut/Ungarn (Seitz, Eschelbach)
GPS- und astronomische Messungen im Deformationsnetz Soskut (14. - 19.09.2003)
- 2003 -07 Indonesien (Vetter, Zimmermann, Schmitt)
Projekt Höhlenbewirtschaftung
- 2004 - 05 Universidade Federal do Parana, Curitiba/PR, Brazil (B. Heck)
Gastprofessur (06. - 31.03.2004, 27.02. - 23.03.2005)
- 2006 - 09 Universidade Federal do Paraná, Curitiba/Brasilien
(Heck, Knöpfler, Luo, Mayer, Rösch, Wild-Pfeiffer)
PROBRAL project: Highly Precise Positioning and Height Determination using GPS

- 2008 Silver Spring/MD, USA. National Geodetic Survey (B. Heck)
Forschungsaufenthalt (August-September 2008)
- 2008 - 14 Java/Indonesien (Schmitt, Rösch, Vetter, Bernhard, Benner)
Integrated Water Resource Management (IWRM), Projekt Höhlenbewirtschaftung
- 2008 - 11 TU Delft: Institute for Earth Observation and Space Systems,
Department of Remote Sensing (Bähr)
Forschungsaufenthalte (08.02. - 09.04.2008, 04.08. - 30.10.2009, 7. - 30.03.2011)
- 2010 - 11 Universidade Federal do Parana, Curitiba/PR, Brazil (Rösch)
Kurzzeitdozentur (März 2010, März 2011)
- 2011 - 13 Universidad de Concepcion, Concepcion, Chile (B. Heck)
Gastprofessur (25.02. - 10.03.2011, 02. - 11.03.2013)
- 2014 American University in Dubai (AUD) (Kuper)
Forschungsaufenthalt (Februar-April 2014)
- 2014 Dubai (Breunig, Butwilowski, Kuper, Laun)
Organization der Internat. 3D GeoInfo Conference (11. - 13.11.2014)
- 2015 Curtin University, Perth, Australia. Department of Spatial Sciences (B. Heck)
Forschungsaufenthalt (Februar-April 2015)
- 2016 TU Delft (Kuper)
Forschungsaufenthalt (Februar-April 2016)
- 2016 Hohai University, Nanjing, China (B. Heck)
Gastprofessur (01. - 15.09.2016)
- 2016 - 18 Java/Indonesien (Rösch, Vetter)
Tectran, Evaluierung IWRM
- 2018 Brasilien/Salvador (Breunig, Kuper, Mazroob)
DAAD Projekt Probral (Oktober 2018)
- 2018 Astronomisches Institut der Universität Bern/Schweiz (Grombein)
Forschungsaufenthalt (06.08. - 26.10.2018)

Studentische Ehrungen, soziales Engagement und Auslandsaufenthalte

Deutschlandstipendium

2017/18 Bertels, Marcel

Umwelt Preis der Sparkasse Karlsruhe

2016 Ko, Dorothea
2014 Heublein, Marion
2010 Fuhrmann, Thomas
2006 Luo, Xiaoguang

DAAD-Preis für hervorragende Leistungen ausländischer Studierender

2016 Mazroob Semnani, Nima (Iran)
verliehen vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
2002 Alkhatib, Hamza (Syrien)
verliehen von der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

Exzellenzpreis Deutsch-Französische Hochschule (DFH)

Der Preis wird von der Fédération Nationale des Travaux Publics gefördert.

Studiengang: Geodäsie und Geoinformatik, Topographie.

Karlsruher Institut für Technologie / INSA de Strasbourg.

2014 Heublein, Marion Thema der Abschlussarbeit: *Vergleichende Analysen zur Fusion der Beiträge von GNSS- und InSAR-Beobachtungen im Rahmen der Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts.*

Tulla-Medaille

Zum Gedenken an Johann Gottfried Tulla, den maßgeblichen Mitbegründer der Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe. Gemäß Satzung kommen diejenigen Diplomingenieure als Preisträger in Betracht, *"die sich in der Diplom-Hauptprüfung des abgelaufenen Studienjahres besonders ausgezeichnet haben. Die Stiftung (Eheleute em. Prof. Dr.-Ing. Hans Günter Krebs und Frau Hannelise Krebs) hat den Zweck, den mit der Verleihung der Tulla-Medaille an den jahresbesten Diplom-Ingenieur der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen verbundenen Geldpreis so zu erhöhen, wie es dieser höchsten Fakultätsauszeichnung angemessen ist."*

(<https://www.bgu.kit.edu/tulla-preistraeger.php>)

2015	Ko, Dorothea
2014	Heublein, Marion
2008	Schmitt, Andreas
2006	Bähr, Hermann
2000	Schön, Steffen
1996	Eichhorn, Andreas
1967	Thiele, Peter
1965	Kern, Friedel
1963	(Erste Verleihung der Medaille)

Ludwig-Lenz-Züblin-Preis (vorm. Ludwig-Lenz-Stiftung)

Anlässlich der Vollendung des 80. Lebensjahres ihres Vorstandsmitgliedes Ludwig Lenz errichtete die Firma Züblin im Jahre 1969 eine Stiftung, mit der sie ihre ständige Verbundenheit mit der Fakultät zum Ausdruck bringt. *"Aus dem Ertrag der Stiftung kann die Fakultät alljährlich die besten Absolventen der Studiengänge Bauingenieurwesen und Vermessungswesen mit einer Urkunde und einem Geldpreis auszeichnen. Die Auswahl wird durch den Fakultätsrat getroffen und die Preisverleihung erfolgt im Rahmen von Fakultätsveranstaltungen."*

(https://www.bgu.kit.edu/lenz_zueblin_preis.php)

2018	Kern, Jens
	Welte, Amelie
2017	Hillemann, Markus
	Steinke, Teresa
	Steinmeyer, Corinna Rebecca
2014	Müßle, Melanie
2012	Dubois, Clemence
	Limberger, Marco
	Vatter, David

2011	Fuhrmann, Thomas Grombein, Thomas
2010	Günther, Anne Schmidt, Florian
2007	Werder, Stefan Luo, Xiaoguang Rehor, Miriam
2004	Abele, Marcel Jarecki, Focke Marten Krattenmacher, Markus Steidl, Rainer
2001	Schön, Steffen
2000	Kern, Michael König, Daniel
1999	Kupferer, Stephan
1998	Howind, Jochen
1997	Dinter, Georg Mayer, Michael
1996	Lenk, Ulrich
1994	Jakobs, Heiko
1993	Leinen, Stefan Schwartz, Stephan Vogel, Manfred
1992	Kutterer, Hansjörg Schulte, Ludger Seitz, Kurt
1991	Constantin, Peter
1990	Drixler, Erwin
1989	Scheuring, Robert
1987	Quasnitza, Hans
1986	Liebscher, Franz
1985	Klees, Roland Nierula, Bernd
1984	Arnold, Hans-Dieter Grüninger, Werner Lies, Axel Storz, Konrad
1982	Demuth, Gaston Merkel, Hubert

- 1981 Illner, Michael
Bill, Ralf
Göler von Ravensburg, Ingrid
Möller, Günter
Barth, Erich
- 1979 Karrer, Werner
Schweizer, Rainer
- 1978 Heck, Bernhard
Heil, Ernst
Klauser, Berthold
- 1977 Mönicke, Hans-Joachim
Lorig, Axel
Franz, Peter
Müller, Hartmut

Studierende im Ausland

Studierende in aktuelle Forschungsprojekte und Messkampagnen einzubeziehen hat eine lange Tradition am GIK. Zum einen können sie dadurch die im Studium erworbenen Fähigkeiten erproben und vertiefen zum Anderen nehmen sie die Möglichkeit wahr überfachliche Kompetenzen zu erwerben. Zu den letztgenannten gehören u. a. die eigenverantwortliche Planung, Durchführung und Auswertung der Messungen. Oft begleiten sie den vermessungstechnischen Part einer Ausgrabung z. B. in Zusammenarbeit mit

- Inst. für Ur- und Frühgeschichte, Universität Heidelberg
- Kommission für Allgemeine und Vergleichende Archäologie, Bonn
- Inst. für Archäologie, Seminar für Vorderasiatische Altertumskunde, FU Berlin
- Inst. für Baugeschichte, KIT
- Inst. für Vor- und Frühgeschichte und Vorderasiatische Archäologie, Universität Saarbrücken
- Heidelberger Akademie der Wissenschaften
- Seminar für Archäologie, Universität Würzburg
- Altorientalisches Seminar, Universität Münster
- Archäologisches Institut, Universität Freiburg
- Deutsches Archäologisches Institut (DAI), Abteilung Istanbul (Aufnahmen in Pergamon, Anazarbos, Karasis)
- Seminar für Orientalische Archäologie und Kunstgeschichte, Uni Halle (Aufnahmen in Ägypten).

Bei zahlreichen internationalen Messkampagnen die vom GIK durchgeführt oder in Kooperation mit anderen Institutionen stattfinden, leisten Studierende am Studiengang GuG einen wichtigen Beitrag. Zu nennen sind hier z. B.:

- Kampagne Ost-Grönland
- Geowissenschaftliche Expedition, Spitzbergen
- Ökologieprojekt des Pantanal von Mato Grosso, Cuiaba/Brasilien
- Alpentravese 1991, 1992, 1994, 1999
- German Antarctic Project 1995, Antarktische Halbinsel
- Rahmennetz, Friaul/Italien
- EUCOR-URGENT (GPS-Netz Oberrheingraben) 1999, 2000, 2003
- Kampagne, SFB 461 Starkbeben, 1997/1999/2000, Karpaten/Rumänien
- Projekt Referenznetz Antarktis 2, 1998, Antarktische Halbinsel, South Shetland Islands
- Integrated Water Resource Management (IWRM), Indonesia, 2007 - 2016.

SCHRIFTENREIHE DES STUDIENGANGS GEODÄSIE UND GEOINFORMATIK

(ISSN 1612-9733)

- 2003/1 Daniel Koenig, Kurt Seitz**
Numerische Integration von Satellitenbahnen unter Berücksichtigung der Anisotropie des Gravitationsfeldes der Erde. 2003
ISBN 3-937300-00-7
- 2004/1 Marcus Ulrich Schmidt**
Objektorientierte Modellierung zur geodätischen Deformationsanalyse. 2004
ISBN 3-937300-06-6
- 2005/1 Stephan Kupferer**
Anwendung der Total-Least-Squares-Technik bei geodätischen Problemstellungen. 2005
ISBN 3-937300-67-8
- 2007/1 Andreas Knöpfler, Michael Mayer, André Nuckelt, Bernhard Heck, Günter Schmitt**
Untersuchungen zum Einfluss von Antennenkalibrierwerten auf die Prozessierung regionaler GPS-Netze. 2007
ISBN 978-3-86644-110-1
- 2007/2 Xiaoguang Luo, Michael Mayer, Bernhard Heck**
Bestimmung von hochauflösenden Wasserdampffeldern unter Berücksichtigung von GNSS-Doppeldifferenzresiduen. 2007
ISBN 978-3-86644-115-6
- 2007/3 Michael Mürle**
Aufbau eines Wertermittlungsinformationssystems. 2007
ISBN 978-3-86644-116-3
- 2007/4 Heinrich Derenbach, Michael Illner, Günter Schmitt, Martin Vetter, Siegfried Vielsack**
Ausgleichsrechnung – Theorie und aktuelle Anwendungen aus der Vermessungspraxis. 2007
ISBN 978-3-86644-124-8
- 2007/5 André Nuckelt**
Dreidimensionale Plattenkinematik. 2007
ISBN 978-3-86644-152-1
- 2007/6 Hermann Bähr, Zuheir Altamimi, Bernhard Heck**
Variance Component Estimation for Combination of Terrestrial Reference Frames. 2007
ISBN 978-3-86644-206-1
- 2009/1 Cornelia Eschelbach**
Refraktionskorrekturbestimmung durch Modellierung des Impuls- und Wärmeflusses in der Rauigkeitsschicht. 2009
ISBN 978-3-86644-307-5

- 2009/2 Bernhard Heck, Michael Mayer (Hrsg.)**
Geodätische Woche 2009
22.–24. September 2009, Messe Karlsruhe, Rheinstetten im Rahmen der INTERGEO –
Kongress und Fachmesse für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. Abstracts. 2009
ISBN 978-3-86644-411-9
- 2010/1 Thomas Grombein, Kurt Seitz, Bernhard Heck**
Untersuchungen zur effizienten Berechnung topographischer Effekte auf
den Gradiententensor am Fallbeispiel der Satellitengradiometriemission GOCE. 2010
ISBN 978-3-86644-510-9 / KIT Scientific Reports 7547
- 2010/2 Thomas Fuhrmann, Andreas Knöpfler, Michael Mayer,
Xiaoguang Luo, Bernhard Heck**
Zur GNSS-basierten Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts mittels Precise
Point Positioning. 2010
ISBN 978-3-86644-539-0 / KIT Scientific Reports 7561
- 2010/3 Geodätisches Institut (Hrsg.)**
Vernetzt und ausgeglichen
Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Günter Schmitt. 2010
ISBN 978-3-86644-576-5
- 2012/1 Michael Mayer, Claudia P. Krueger, Bernhard Heck (Hrsg.)**
Highly Precise Positioning and Height Determination using GPS. Results of a
PROBRAL project by Universidade Federal do Paraná (UFPR, Curitiba, Brazil)
and Karlsruhe Institut für Technologie. 2012
KIT Scientific Reports 7604
- 2013/1 Melanie Müßle, Bernhard Heck, Kurt Seitz, Thomas Grombein**
Untersuchungen zur planaren Approximation im Geodätischen Randwertproblem. 2013
ISBN 978-3-7315-0095-7 / KIT Scientific Reports 7652
- 2013/2 Hermann Bähr**
Orbital Effects in Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry. 2013
ISBN 978-3-7315-0134-3
- 2014/1 Marion Heublein**
Towards a rigorous fusion of GNSS and InSAR observations for the purpose
of water vapor retrieval. 2014
ISBN 978-3-7315-0270-8
- 2015/1 Andreas Knöpfler**
Korrektur stationsabhängiger Fehler bei GNSS. 2015
ISBN 978-3-7315-0352-1
- 2017/1 Thomas Grombein**
Gravity forward modeling with a tesseroid-based Rock-Water-Ice approach – Theory and
applications in the context of the GOCE mission and height system unification. 2017
ISBN 978-3-7315-0655-3

- 2018/1** **Alexandra Heck, Kurt Seitz, Thomas Grombein, Michael Mayer, Jan-Moritz Stövhase, Hael Sumaya, Maryse Wampach, Malte Westerhaus, Lisa Dalheimer, Philipp Senger (Hrsg.)**
(Schw)Ehre, wem (Schw)Ehre gebührt: Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernhard Heck. 2018
ISBN 978-3-7315-0777-2
- 2018/2** **Geodätisches Institut (Hrsg.). Zusammengestellt von Kurt Seitz**
Festschrift zur 150-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts (1868 - 2018). 2018
ISBN 978-3-7315-0856-4

SCHRIFTENREIHE DES STUDIENGANGS GEODÄSIE UND GEOINFORMATIK

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

ISSN 1612-9733
ISBN 978-3-7315-0856-4

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-0856-4



9 783731 508564 >