

# 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 eingezogen, 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 Schwerfeldes 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 beschritten 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 Beobertungskonfigurationen 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)**

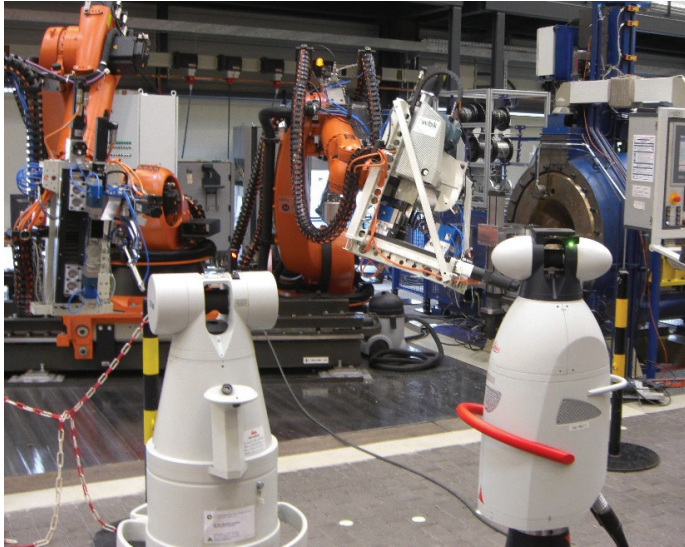
Maria Hennes

### **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  $\mu\text{m}$ -,  $\mu\text{s}$ -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**

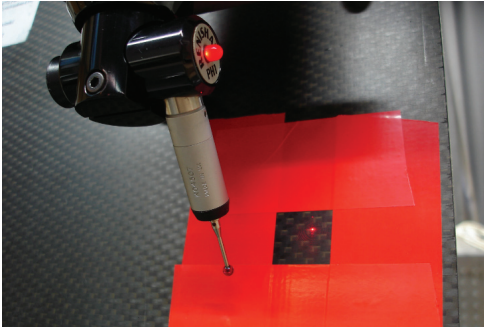
Die Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf die dimensionelle Metrologie im Nahbereich, vor allem zur Qualitätssicherung in der industriellen Fertigung. Denn im Hinblick auf immer enger werdende Toleranzen und fortschreitende individualisierte Fertigung reicht die bisher übliche stichprobenartige 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  $\mu\text{m}$ - bzw.  $\mu\text{s}$ -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  $\mu\text{m}$  und wenigen  $\mu\text{s}$  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  $\mu\text{m}$ -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 GFK<sup>1</sup> durchgeführt (vgl. Abb. 19).

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

<sup>1</sup> 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 RTW<sup>2</sup>.

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

---

<sup>2</sup> 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 OTTM<sup>3</sup> 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 GKGM<sup>4</sup> 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-Projekt<sup>5</sup> entwickelte autonome Roboter soll für weitere Präzisionsanwendungen erweitert und mit weiteren Sensoren und Aktoren kombiniert werden (2). Die Kopplung dieses autonomen Roboters mit A-TOM<sup>6</sup>

---

<sup>3</sup> OTTM: Optical Turbulent Transfer Model

<sup>4</sup> GKGM: Gesellschaft zur Kalibrierung geodätischer Messmittel

<sup>5</sup> ZIM: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand

<sup>6</sup> 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-Programms<sup>7</sup> der Aufenthalt bei der nationalen britischen Eichinstitution (NIST) ermöglicht.

---

<sup>7</sup> GRACE-Programm: Graduiertenschule des KIT-Zentrum Klima und Umwelt