

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 Offsetkorrektion 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 Stufen im Breisgau

Im Jahr 2007 wurden im Innenstadtbereich von Stufen 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 Stufen (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).

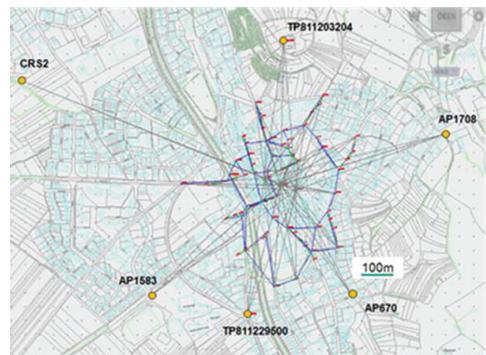


Abb. 82: Überwachungsnetz in Stufen (GIK).

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.

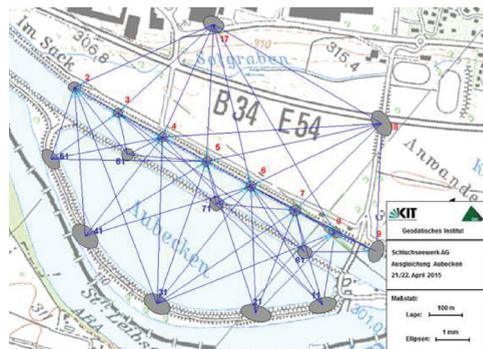


Abb. 84: Deformationsnetz Aubecken.

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.

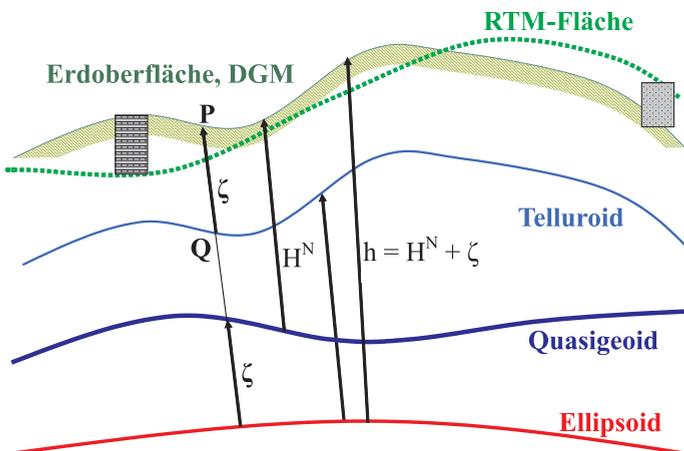


Abb. 87: Beziehungen zwischen DGM, RTM, h , H^N und ζ .

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.

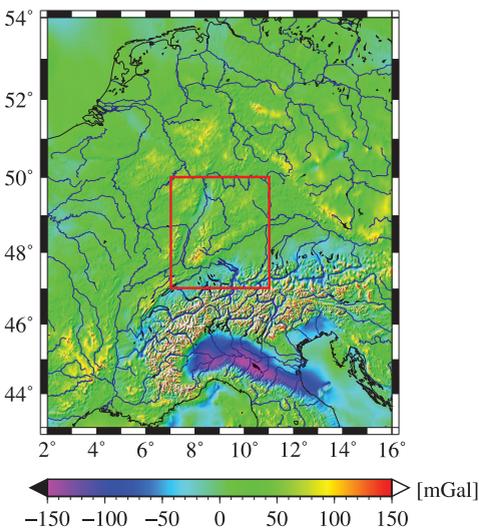


Abb. 88: Schwereanomalien Δg und Begrenzung des Berechnungsgebiets.

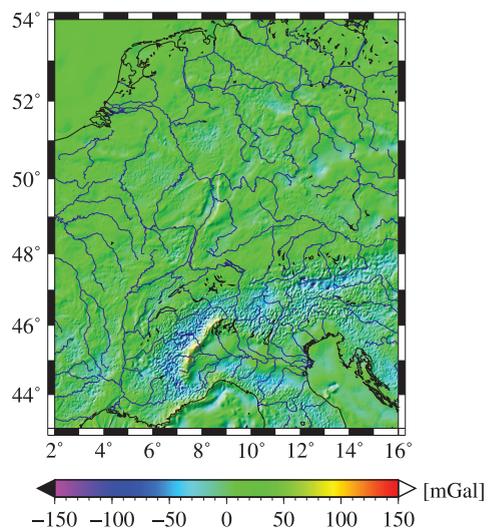


Abb. 89: Residuale Schwereanomalien δg_{RES} .

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

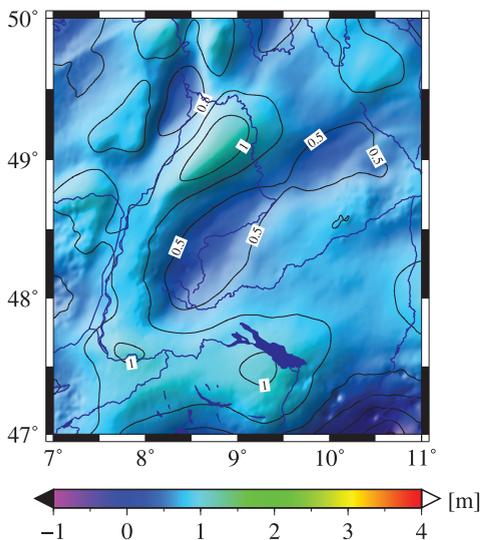


Abb. 90: Residuale Höhenanomalien $\delta\zeta_{res}(\Psi_{c,1.0})_{HG}$.

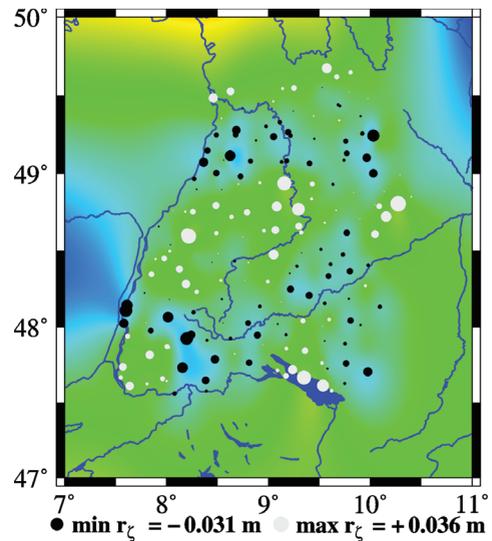


Abb. 91: Residuen r_ζ der Höhenanomalien in den Geodätischen Grundnetzpunkten.

(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

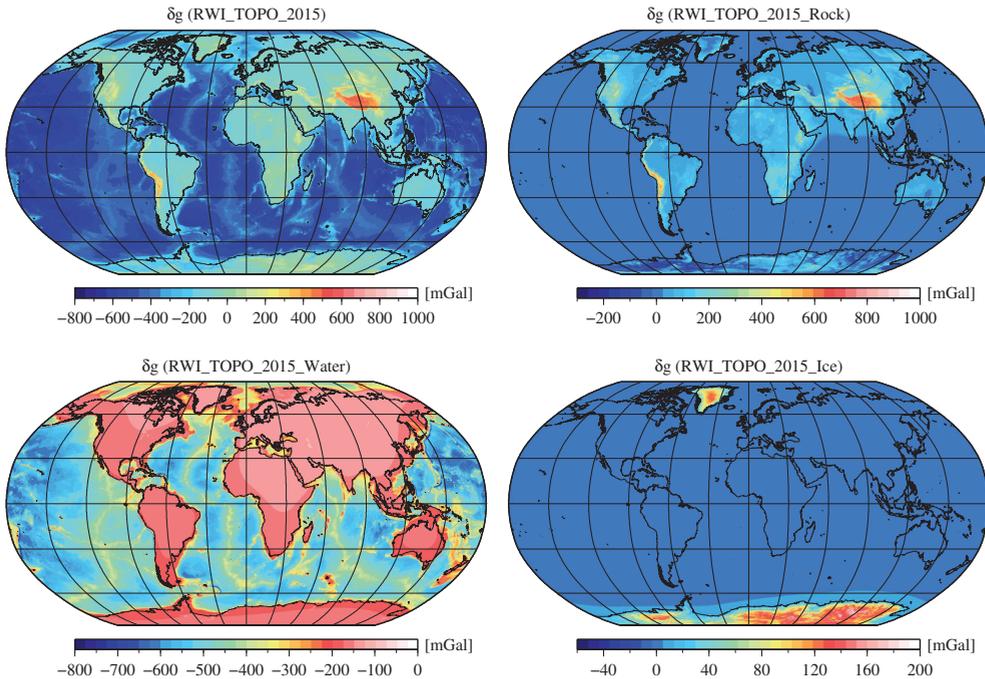


Abb. 92: Topographisches Schwere-signal auf der Oberfläche des GRS80 Ellipsoids ausgewertet mit den Modellen RWI_TOPO_2015, RWI_TOPO_2015_Rock, RWI_TOPO_2015_Water und RWI_TOPO_2015_Ice.

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 Freiberger Junior (2007) während seines Aufenthaltes am GIK (UniBral/ProBral) diese Kompetenzen erarbeitet und am LAGE UFPR in Curitiba/Brasilien etabliert (Freiberger 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-

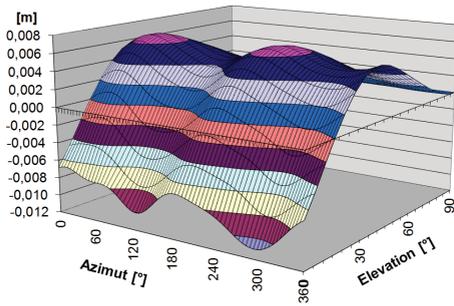


Abb. 94: Relative PZV-Werte für GPS L1 für eine Leica AT 503 Antenne.

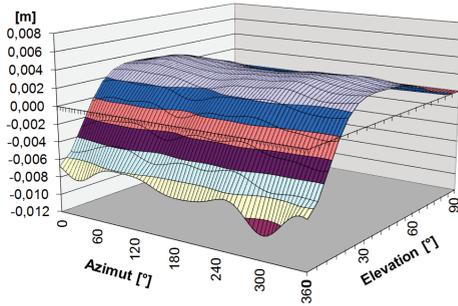


Abb. 95: Relative PZV-Werte für GPS L2 für eine Leica AT 503 Antenne.

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.

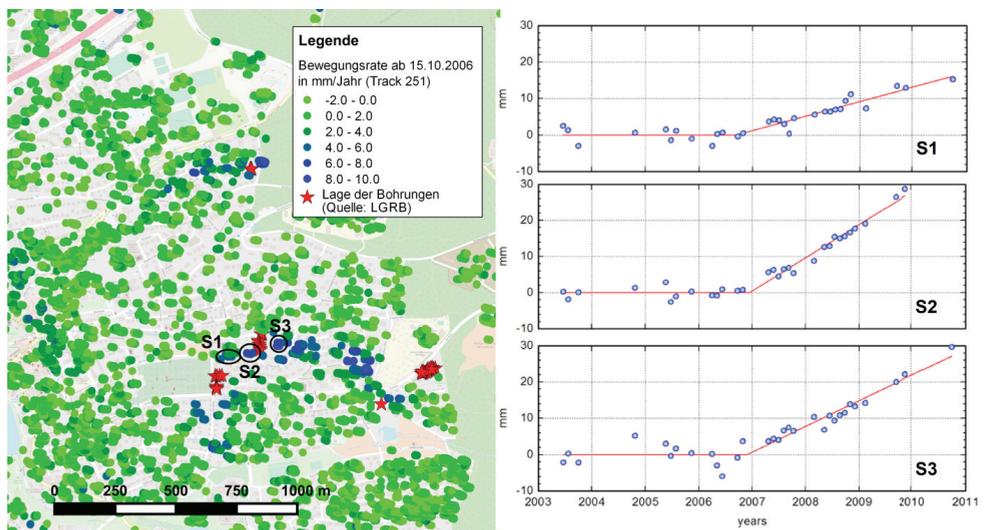


Abb. 98: Lage der Persistent-Scatterer-Punkte (PS-Punkte) im östlichen Stadtgebiet von Böblingen (links). Zwei Hebungs- bzw. Schadensgebiete treten deutlich hervor (blaue Farben). Der rechte Teil der Abbildung zeigt drei Beispielzeitreihen aus dem südlichen Schadensgebiet. Die rote Linie kennzeichnet 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-

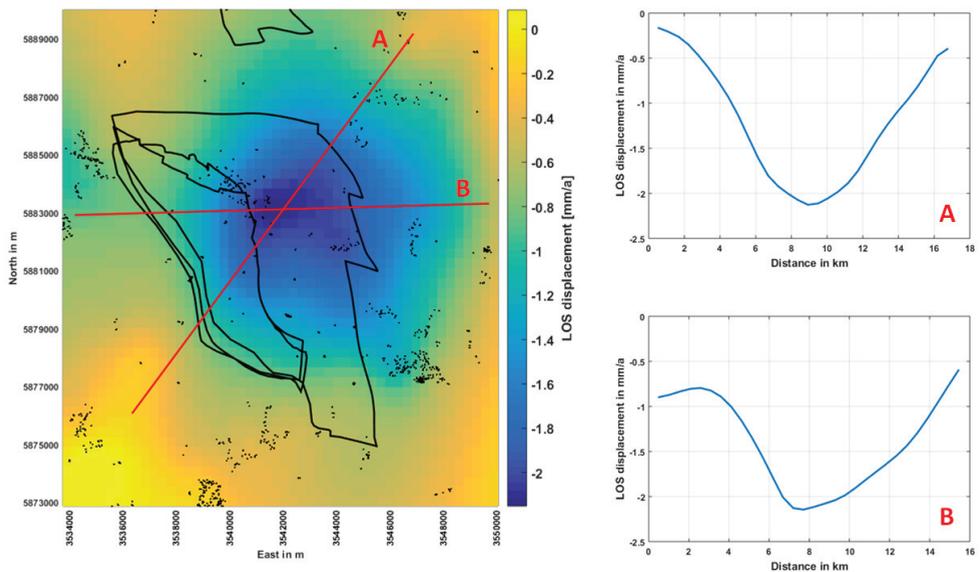


Abb. 99: Thin-plate-spline Approximation des aus der SAR-Interferometrie abgeleiteten Geschwindigkeitsfeldes über der Gaslagerstätte Söhligen (links). Schwarze Punkte geben die Lage der Persistent-Scatterer-Punkte an (Datensatz ERS-1/2, 1992 - 2001), schwarze Linien kennzeichnen den Umriss des Gasfeldes. 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.

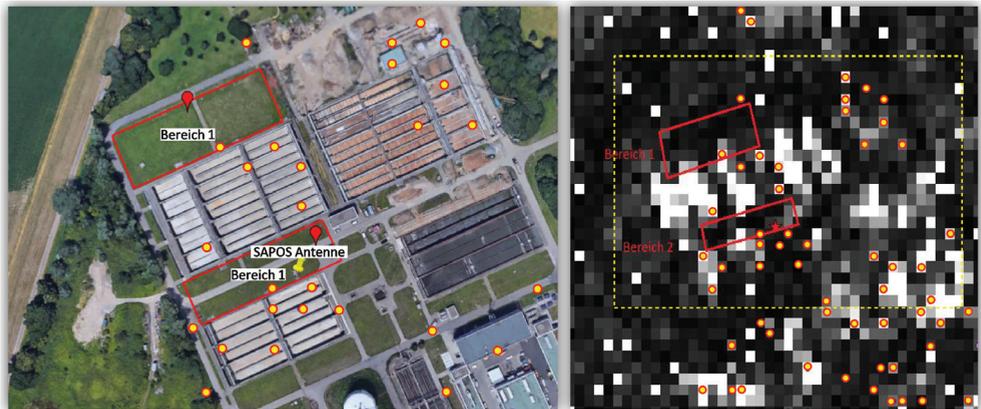


Abb. 100: Die linke Seite zeigt die auf dem Gelände der Kläranlage Mannheim detektierten langzeitstabilen Rückstreuer (PS-Punkte, gelbrote Kreise). Helle Pixel im Intensitätsbild (rechts) markieren Bereiche, aus denen viel Signalenergie zurückgestreut wird, ohne dass in jedem Fall die Kriterien für einen PS-Punkt erfüllt sind. Beides sollte in der Nachbarschaft eines Corner-Reflektors vermieden werden. Rote Rechtecke zeigen geeignete Aufstellungorte 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

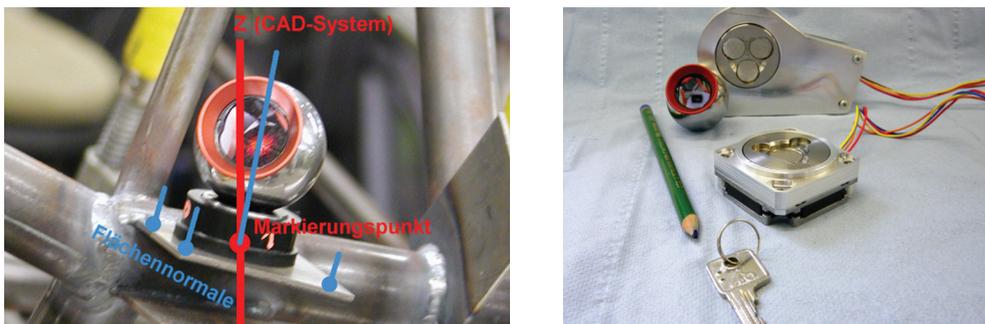


Abb. 101: Links: Markierungswerkzeug PMM (Pose Mark Mount) zur dreidimensionalen Absteckung (Markierung) von Punkten auf beliebig orientierten Flächen. Rechts: nachführbare Reflektorhalterungen (active hubs) in diversen Ausführungen.

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

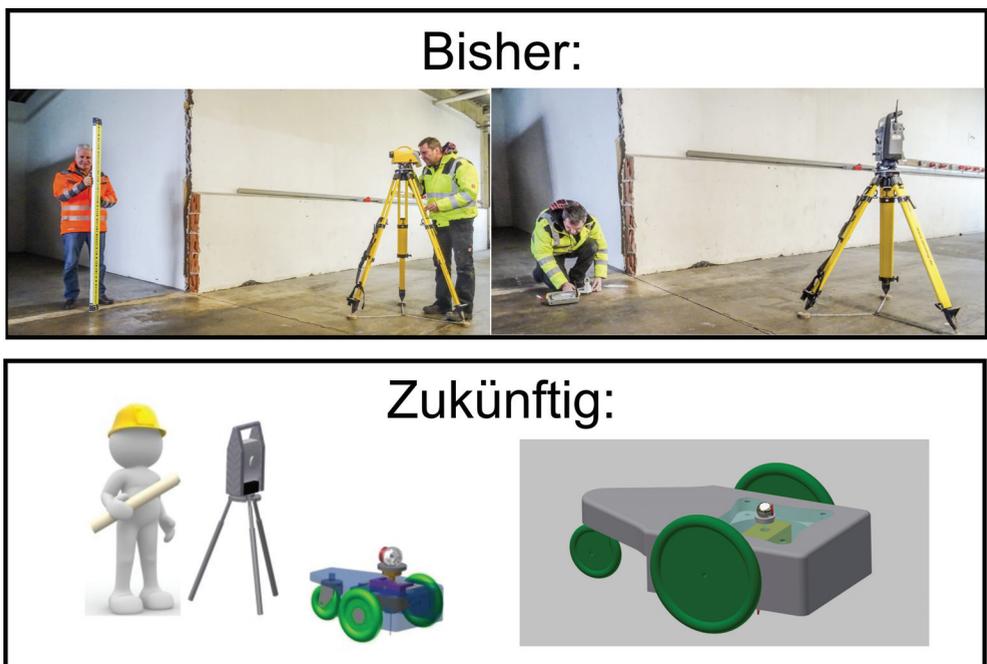


Abb. 102: Oben: bisherige personalintensive Situation: Höhenbestimmung und Markierung (Quelle: Vermessungsbüro Lingel). Unten: Einsatzszenario und Konstruktionszeichnung des derzeit am GIK in Entwicklung befindlichen nahezu personal-unabhängig arbeitenden Höhenmess- bzw. Markierungsroboters, der bis 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 Blockausrichtprozesse 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)

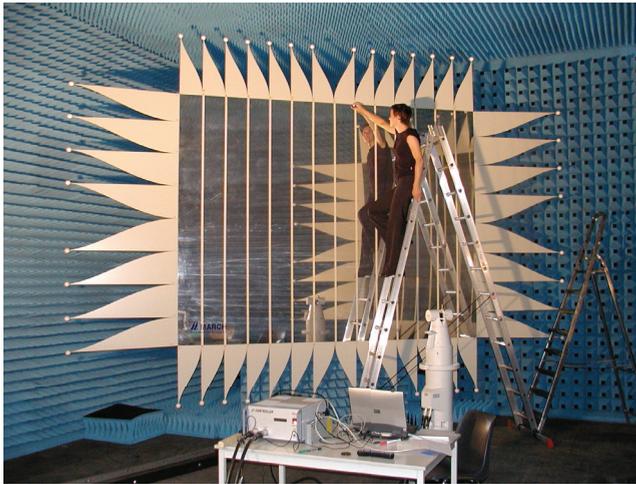


Abb. 104: Formbestimmung eines Zylinderparabols eines Compact Antenna Test Ranges.

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 Messwernerfassung 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

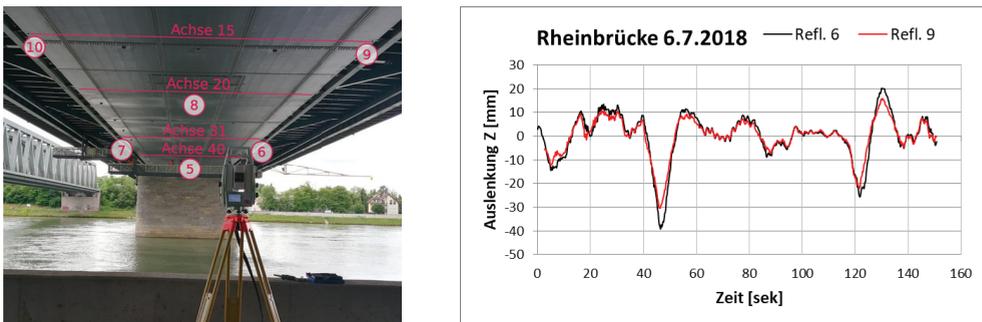


Abb. 107: Messanordnung (links) und Deformation an zwei synchron beobachteten Brückenpositionen (6 und 9) während der Belastung (rechts).

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-

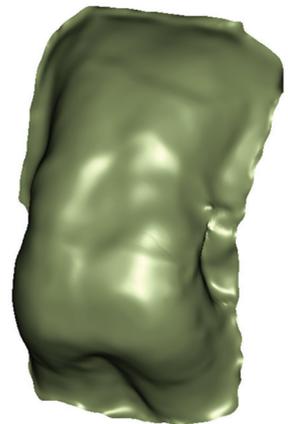


Abb. 108: Links: einige der abgesteckten Bohrungen am Rahmen. Rechts: aus Scandaten rekonstruiertes Modell des Abdrucks als Grundlage für die Konstruktion der Sitzschale.

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).

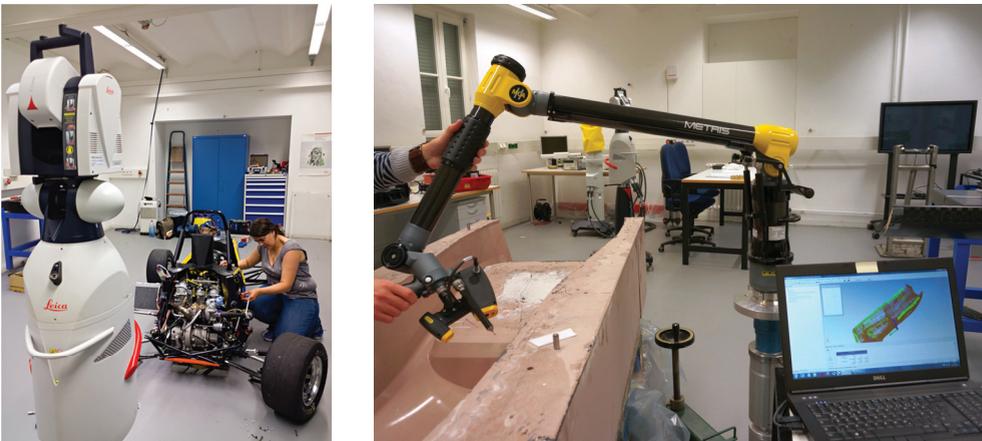


Abb. 109: Links: Einmessung der Achsschenkel beim Rennwagen mittels Lasertracker. Rechts: Kontrollmessung der Monoque-Halbschalen mittels Messarm und Linienscanner.

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-

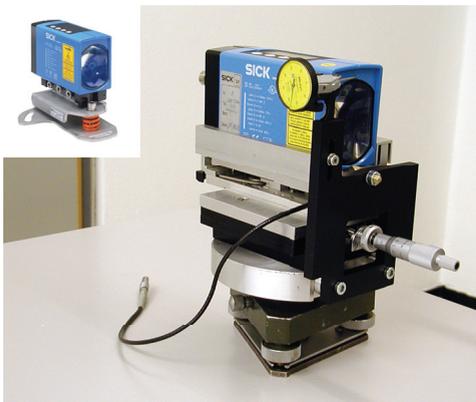


Abb. 110: SICK DME500 mit Langlochmontierung (links) und mit Dreifußadaption (rechts).



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 tesseroïd-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 tesseroïd. *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 Grüninger, 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 tesseroïd, 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.
- Juretcko, 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).