

# Forschung am Geodätischen Institut

Martin Breunig, Bernhard Heck und Maria Hennes

## 1 Lehrstuhl für Geoinformatik

Martin Breunig

### 1.1 Vorbemerkungen

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

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

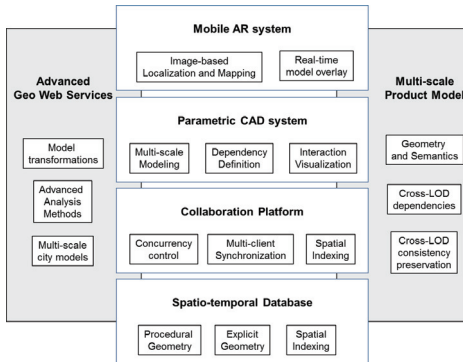
über fachfremde Entscheidungsträger aus unterschiedlichen Ressorts bis hin zu Laien im Rahmen der Bürgerbeteiligung geprägt, die zudem i.d.R. räumlich verteilt arbeiten. Ein drei- bzw. vierdimensionales Stadt- und Bauwerksmodell (3D + Zeit), das nicht nur die vorhandenen Hochbauten, sondern ebenso die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

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

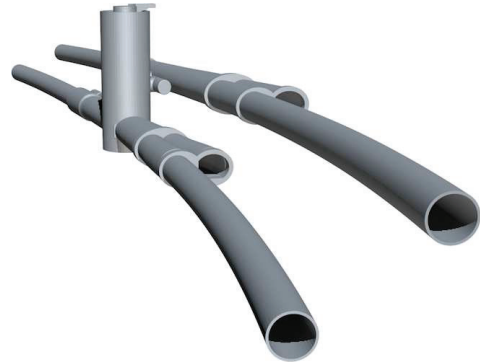
## 1.2 Systemarchitektur und Anwendungsfall

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

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



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



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

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

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

## 1.3 Software-Komponenten für die kollaborative Trassenplanung

### Kollaborations-Plattform mit integrierten Simulationen

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

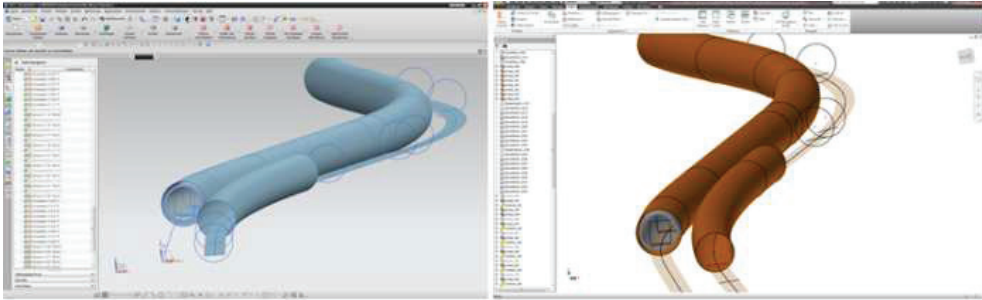


Abb. 31: Prozedurales Tunnelmodell, gleichzeitig repräsentiert mit zwei verschiedenen CAD Systemen.

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

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

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

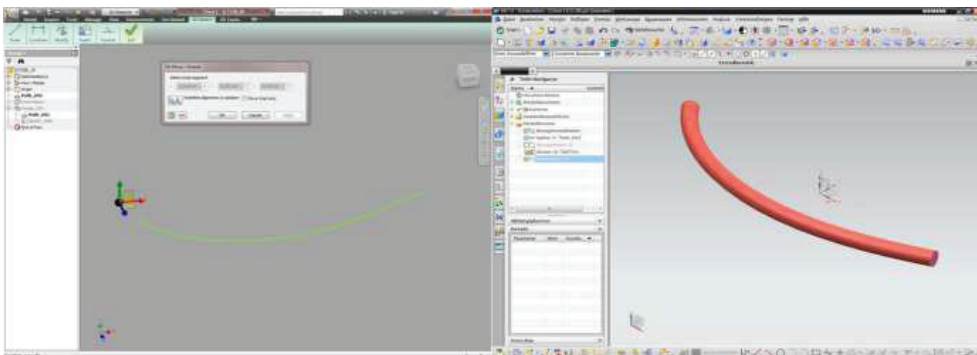


Abb. 32: Während der Modifikation: Sperren eines Elementes (links) und aller im Baum nachfolgenden (rechts) für alle Benutzer.

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

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

### **Multi-skalige Methoden für die Planung von Infrastruktur**

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

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

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

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

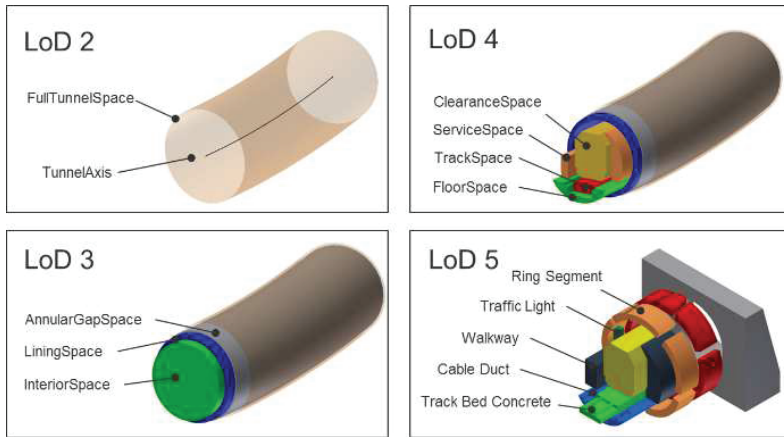


Abb. 33: Eine 3D Repräsentation verschiedener LoDs des multi-skaligen Schild-Tunnel Produkt Modells.

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

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

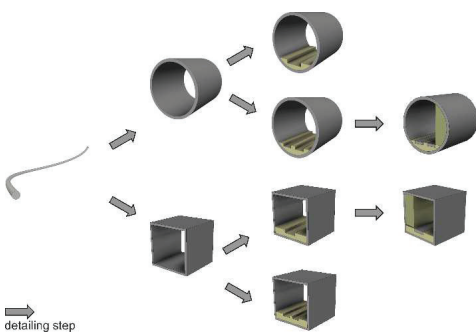


Abb. 34: Konzeptuelle Illustration einiger Stufen der Detailbildung in einem Tunnelplanungsprozess.

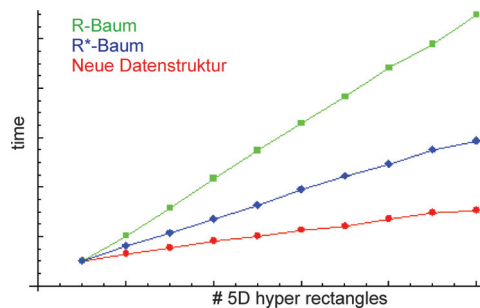


Abb. 35: Normalisierte Resultate für das Objekt-Retrieval von R-Baum, R\*-Baum und der neuen Datenstruktur.

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

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

### Raum-zeitliche Datenbank und hybride räumliche Datenhaltung

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

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

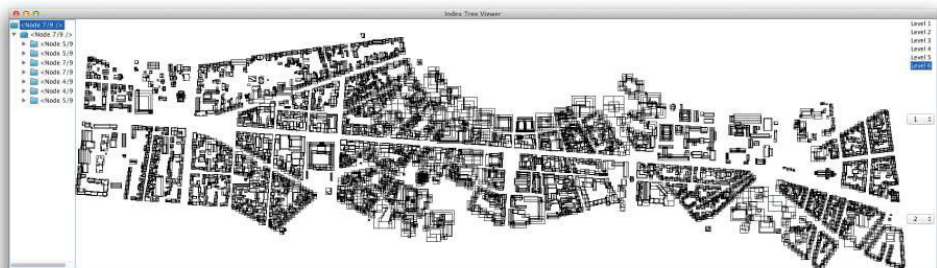


Abb. 36: Datensatz für die Validierung: Teil des Karlsruher Stadtmodells.

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

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

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

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

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

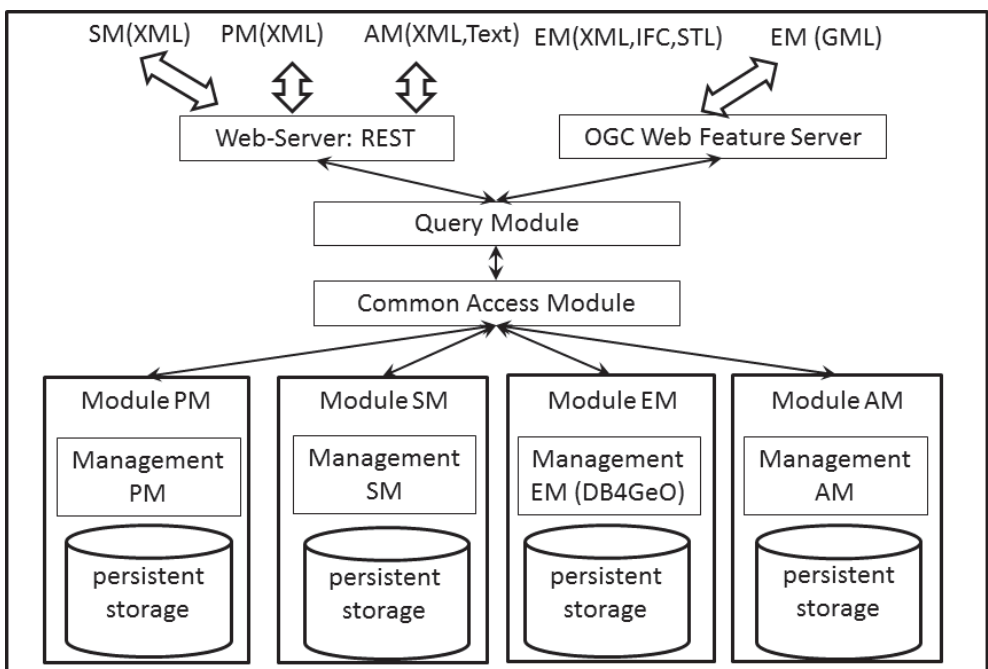
Aus der Betrachtung der Vorgehensweise bei der Konstruktion der Trassen-Daten folgen starke Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Repräsentationen. Insbesondere ist das EM vollständig vom PM und SM abhängig, und es gibt keine Rückkopplung vom EM zum PM. Folglich müssen alle Aktualisierungen des Datensatzes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

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



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

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



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

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

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

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

## 1.4 Erweiterte Geo-Web-Dienste

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

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

## 1.5 Augmented Reality System

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

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

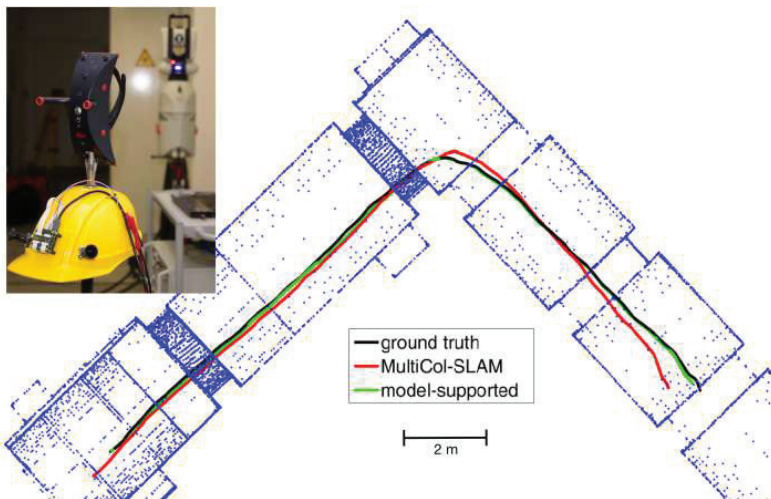
Der erste Schritt der kamerabasierten Tracking-Methode ist die Initialisierung des Systems durch Selbstlokalisierung innerhalb der Szene. Zwei verschiedene Lokalisierungsmethoden wurden entwickelt. Die erste ist die Neulokalisierung des MCS entweder nach einem Tracking Verlust oder wenn die Systeme einen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

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

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

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

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



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

## 1.6 Fazit

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

## 2 Lehrstuhl für Physikalische und Satellitengeodäsie

Bernhard Heck

### 2.1 Vorbemerkungen

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

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

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

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

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

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

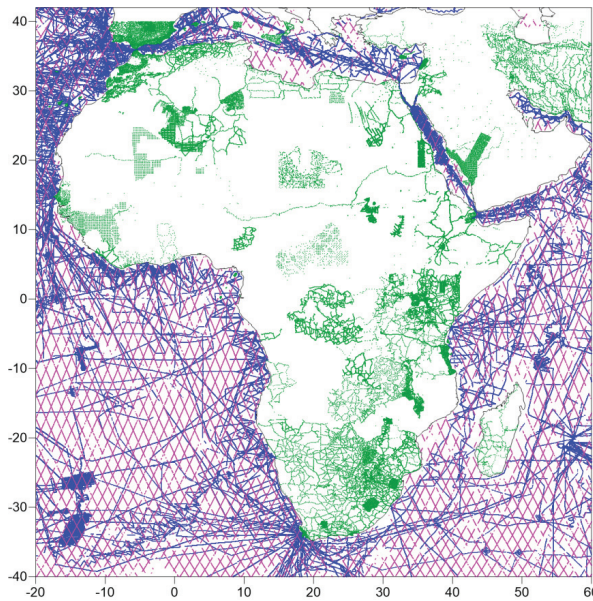
Im Folgenden werden einige dieser Forschungsarbeiten, die überwiegend von der DFG, der EU, dem DAAD und verschiedenen Ministerien finanziell unterstützt wurden und großenteils in internationale Programme und Studiengruppen eingebunden waren und sind, im Detail dargestellt; über praktische Anwendungen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

## 2.2 Afrikanisches Geoid

Die Bestimmung einer kontinentalen Höhenreferenzfläche für Afrika, des afrikanischen Geoids, ist Ziel der Sub-Commission 2.4d der Internationalen Assoziation der Geodäsie. Mit den für die gravimetrische Geoidberechnung erforderlichen technischen Arbeiten befasst sich eine internationale Arbeitsgruppe unter der Leitung von Prof. Dr. Hussein Abd-Elmotaal (Minia University, Minia/Ägypten) und Beteiligung des GIK, deren erste Aufgabe die Kompilierung und Homogenisierung der im Bereich von Afrika verfügbaren gravimetrischen (vergl. Abb. 39) und topographischen Daten ist. Ein erstes Zwischenergebnis war die gravimetrische Datenbasis AFRGDB\_V1.0 (Abd-Elmotaal u. a., 2016b, 2018b), die aus der Analyse von gravimetrischen Messungen im Land- und Meeresbereich sowie aus Ergebnissen der Satellitenaltimetrie gewonnen wurde. Herausforderungen bei der Kombination der verschiedenen Datenquellen bestehen einerseits in groben Fehlern in den schiffsgravimetrischen Daten, andererseits in

einer unzureichenden Überdeckung des afrikanischen Kontinents mit Schweremessungen. Die Lücken im terrestrischen Schwerematerial wurden mit Hilfe eines an die afrikanischen Daten angepassten Referenzschwerefeldes (Abd-Elmotaal u. a., 2016a) unter Nutzung des EGM2008-Modells (Pavlis u. a., 2012) und unter Anwendung eines isostatischen Modells geschlossen. Die resultierende Datenbasis AFRGDB\_V1.0 besteht aus einem regelmäßigen Gitter von Schwereanomalien mit einer Auflösung von  $5' \times 5'$  im Breitenbereich  $42^\circ \text{nB} \geq \varphi \geq 40^\circ \text{sB}$  und im Längensbereich  $20^\circ \text{wL} \leq \lambda \leq 20^\circ \text{öL}$ . Unter Nutzung weiterer Datenquellen, Verwendung des neuen GOCE Dir\_R5-Modells als Referenzfeld und unter Anwendung innovativer Interpolationsmethoden wurde die Datenbasis AFRGDB\_V2.0 erstellt (Abd-Elmotaal u. a., 2018a). Eine Validierung der interpolierten Schwereanomalien auf Basis von Daten, die bei der Interpolation nicht benutzt wurden, ergibt eine innere Genauigkeit von ca. 5,5 mGal und eine äußere Genauigkeit von ca. 7 mGal.

Die vom DAAD geförderten Arbeiten zum afrikanischen Geoid werden fortgesetzt.



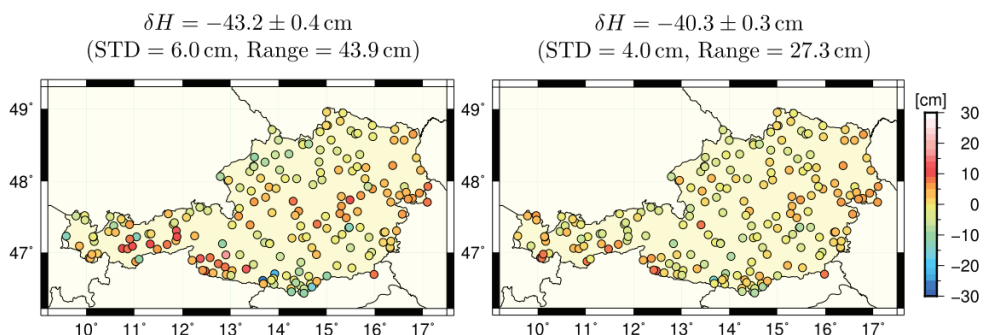
**Abb. 39:** Verteilung der Freiluftanomalien im Bereich von Afrika. Schiffsgravimetrische Daten in Blau, Altimeterdaten in Rot und Schweremesspunkte an Land in Grün.



## 2.3 Globales vertikales Datum und Vereinheitlichung regionaler Höhensysteme

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

Die erste Methode besteht in der Verwendung hochauflösender digitaler Geländemodelle (DGM), aus denen unter gewissen Dichteannahmen die Wirkungen auf das Schwerefeld berechnet werden (Grombein u. a., 2016; Grombein, 2017a,b). Im Rahmen des Projekts wurde auf der Basis einer Darstellung der Topographie durch Tesseroide das bis Grad und Ordnung 2190 vollständige Schwerefeldmodell RWI\_TOPO\_2015 berechnet, mit dem die Auflösung der GOCE/GRACE-Modelle erheblich gesteigert und der Abbruchfehler in Gebirgsgebieten stark verringert werden konnte (siehe Abb. 40). Dieses Modell ist unter [http://www.gik.kit.edu/rwi\\_model.php](http://www.gik.kit.edu/rwi_model.php) bzw. von der ICGEM-WEB-Seite [http://icgem.gfz-potsdam.de/tom\\_reltopo](http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_reltopo) verfügbar.



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

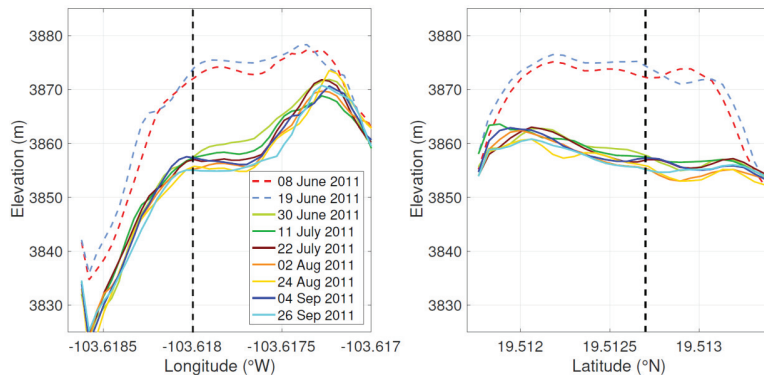
Die zweite Methode geht von der Nutzung terrestrischer Schweredaten aus, deren Verwendung auf ein um Bias-Terme erweitertes Geodätisches Randwertproblems (GRWP) führt; der untersuchte innovative Ansatz beruht auf der Formulierung eines fixen GRWP. Eine Simulation, mit der die Leistungsfähigkeit dieses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

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

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



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

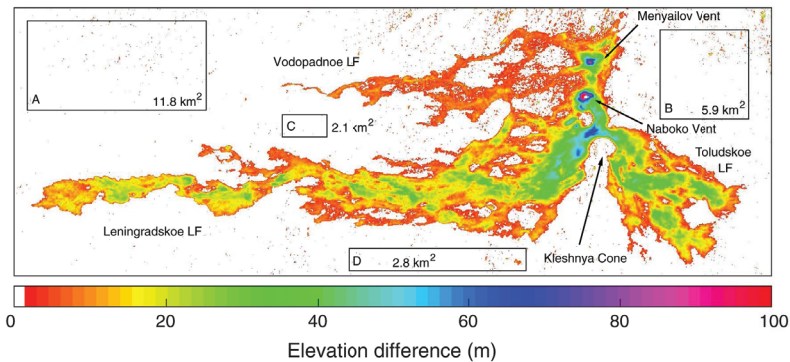


**Abb. 42:** Querschnitte durch das Digitale Oberflächenmodell des Vulkans Colima. Links: West-Ost Profil auf der Breite 19,51270° N. Rechts: Süd-Nord-Profil auf der Länge 103,61800° W. Die gestrichelte schwarze Linie kennzeichnet den Kreuzungspunkt beider Profile. Durch eine kleinere Explosion am 21.06.2011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

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

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

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



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

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

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

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

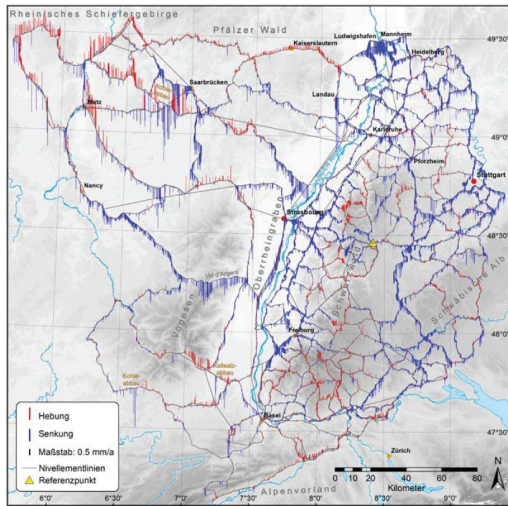
Der Oberrheingraben (ORG), eines der seismisch aktivsten Gebiete in Mitteleuropa, ist Teil eines komplexen Grabensystems, das von der Nordsee bis zum westlichen Mittelmeer reicht. Die meist kleinen Erdbeben sind das Resultat von aktiven tektonischen Prozessen, die an der Erd-

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

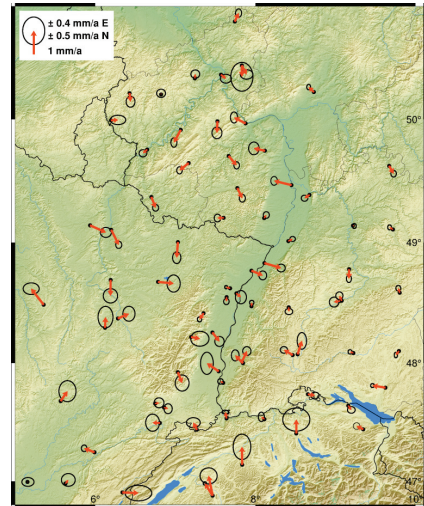
Im Rahmen des über vier Jahre von der DFG geförderten Projektes "Vertikale Krustenbewegungen im Bereich des Oberrheingrabens aus der Analyse von Wiederholungsnivellements, SAR-Interferometrie und GNSS", wurden die im Dreiländereck Deutschland-Frankreich-Schweiz vorhandenen geodätischen Beobachtungsdatensätze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

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

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



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



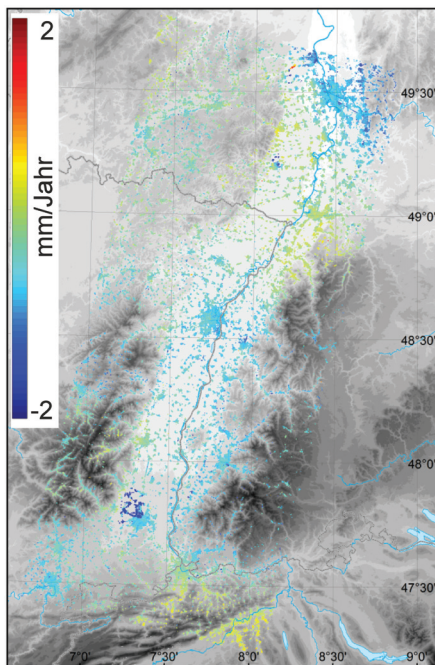
**Abb. 45:** Horizontalgeschwindigkeiten im ORG, berechnet aus den Koordinatenänderungen der in GURN zusammengefassten permanenten GNSS-Stationen.

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

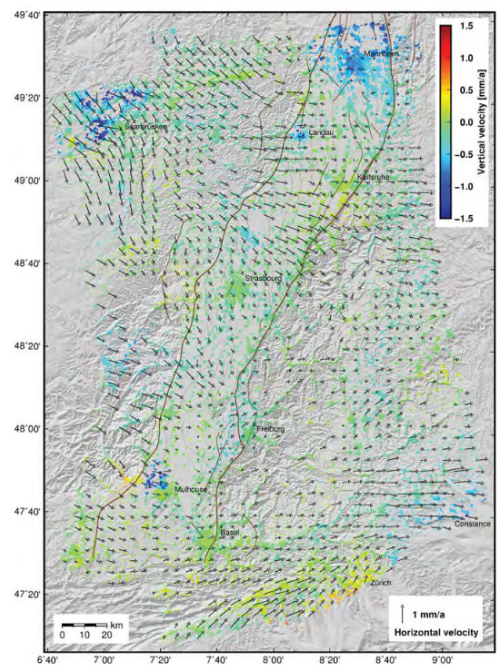
Aufnahmen von Radarsatelliten bilden die dritte Komponente des Messsystems. Die in diesem Projekt genutzten C-Band SAR-Satelliten (ERS-1/2 und Envisat) fliegen in einem durch ihre Bahn vorgegebenen Zyklus mit einer Wiederholungsrate von 35 Tagen über dasselbe Gebiet und nehmen dieses in einer Schrägsicht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

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

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



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



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

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

## 2.6 Das GNSS Upper Rhine Graben Network (GURN)

Andreas Knöpfler (Stadt Heidelberg, Vermessungsamt)

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

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



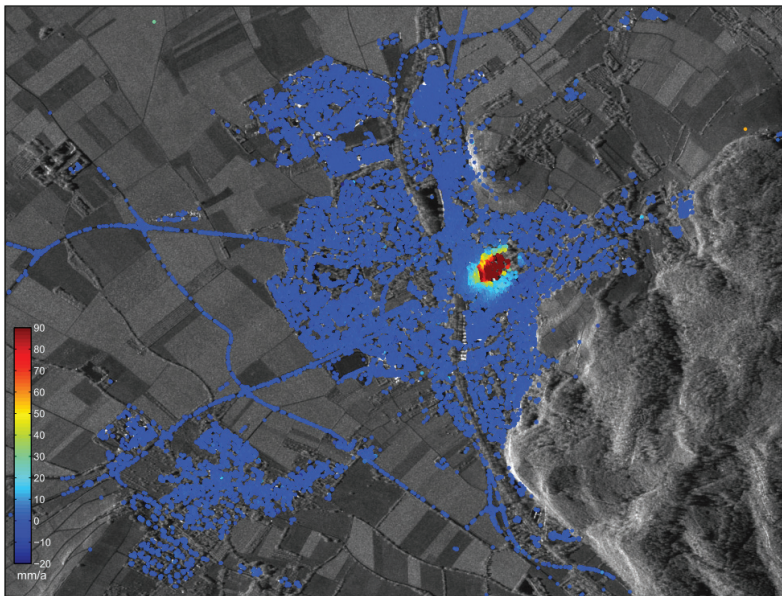
sätzlich fließen die Daten verschiedener EPN- und GREF-Stationen ein. Im südlichen Bereich wird das Netz durch Stationen der schweizerischen Landesvermessung swisstopo ergänzt. Auf französischer Seite werden Stationen verschiedener privater und öffentlicher Anbieter genutzt. Zusätzlich werden die Daten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

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

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

## 2.7 PS-Interferometrie in urbanen Räumen

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



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

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

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

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

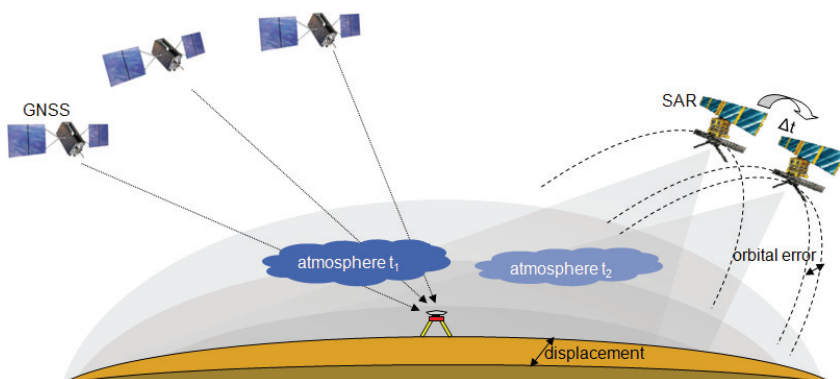
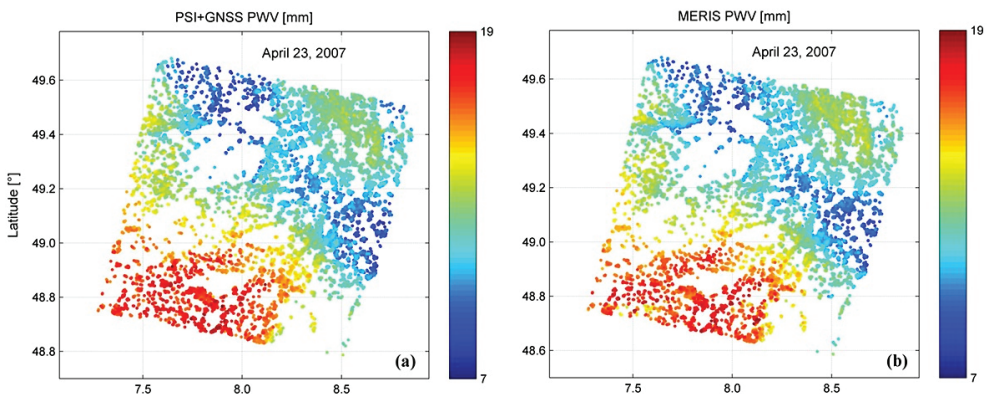


Abb. 49: Satellitengestützte Mikrowellenverfahren unterliegen vergleichbaren Einflüssen in der Atmosphäre.

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

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



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

## 2.9 Schwerefeldmodellierung mit Tesseroiden

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

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

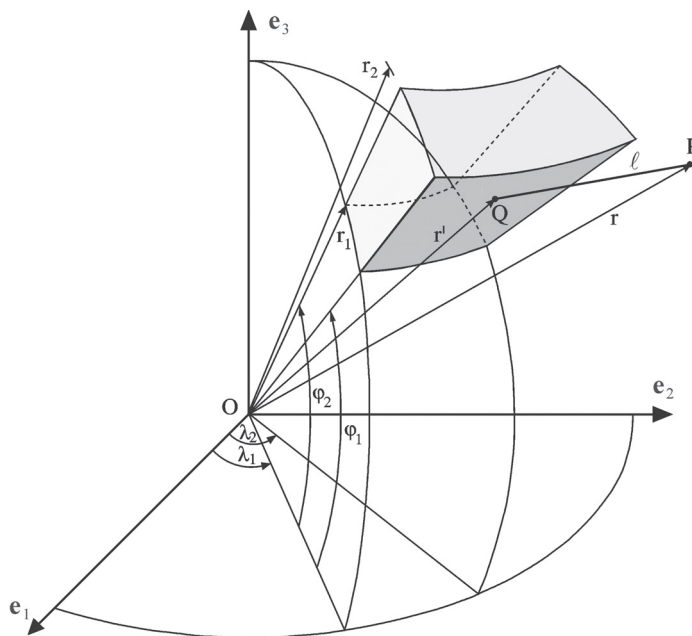


Abb. 51: Geometrie eines sphärischen Tesseroids (Heck und Seitz, 2007).

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

## 2.10 Anwendungen der Tesseroidmethode

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

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

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

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

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

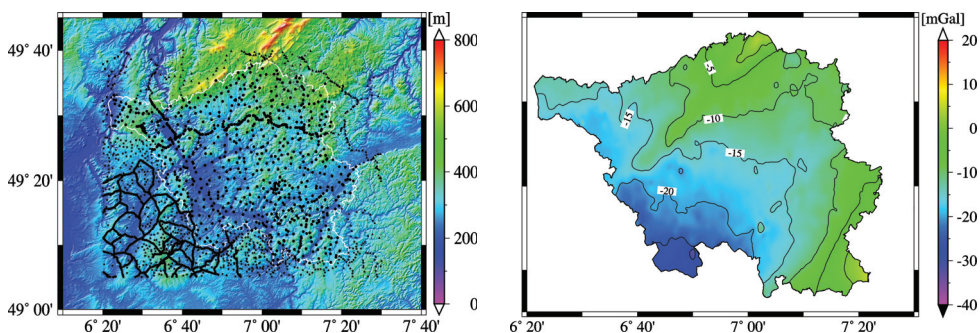
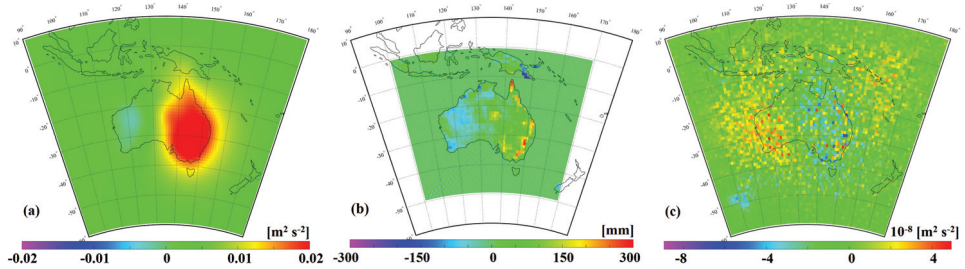


Abb. 52: Bouguerkarte für das Saarland: links DGM und Punktschwerewerte, rechts Bougueranomalien.



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

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

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

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

## 3 Lehrstuhl für Vermessungskunde und Geodätische Sensorik

Maria Hennes

### 3.1 Vorbemerkungen

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

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



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

## **3.2 Kinematisches Messen und Sensorfusion**

### **3.2.1 Motivation**

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

### **3.2.2 Messmitteluntersuchungen**

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

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

### **3.2.3 Modellierung mittels Bayes-Ansatz und Sensorfusion**

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

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

### 3.3 Genauigkeitsmaße

#### 3.3.1 Motivation

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

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

### 3.3.2 Verfahrensansätze

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

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

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

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

### 3.3.3 Praxisbezug

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

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

## 3.4 Selbstkalibrierung und Modellbildung

### 3.4.1 Motivation

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

### 3.4.2 Selbstkalibrierung

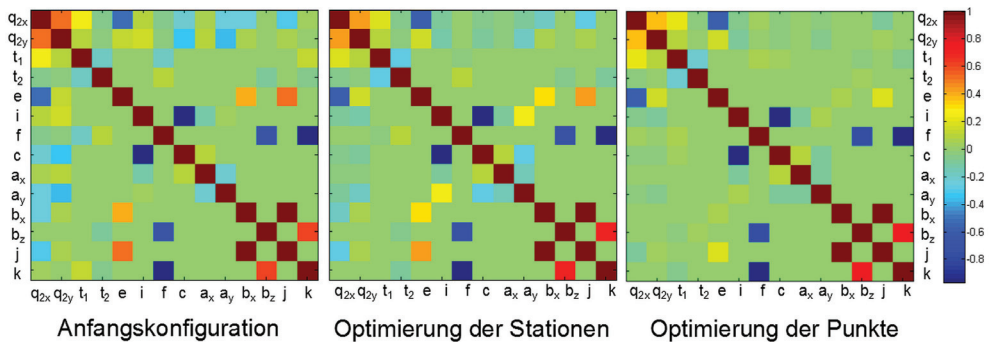
Durch eine Kalibrierung wird die Abweichung des Istwertes zum Sollwert bestimmt. Kalibrierparameter können von den Umgebungsbedingungen abhängig und zeitlich variabel

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

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

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

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



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

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

### 3.4.3 Modellbildung des Messprozesses

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

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

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

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

### **3.5 Prüfung und Kalibrierung von Tachymetern**

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

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

als auch Eigenentwicklungen zur Untersuchung weitergehender instrumenteller Abweichungen wie

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

genutzt.

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



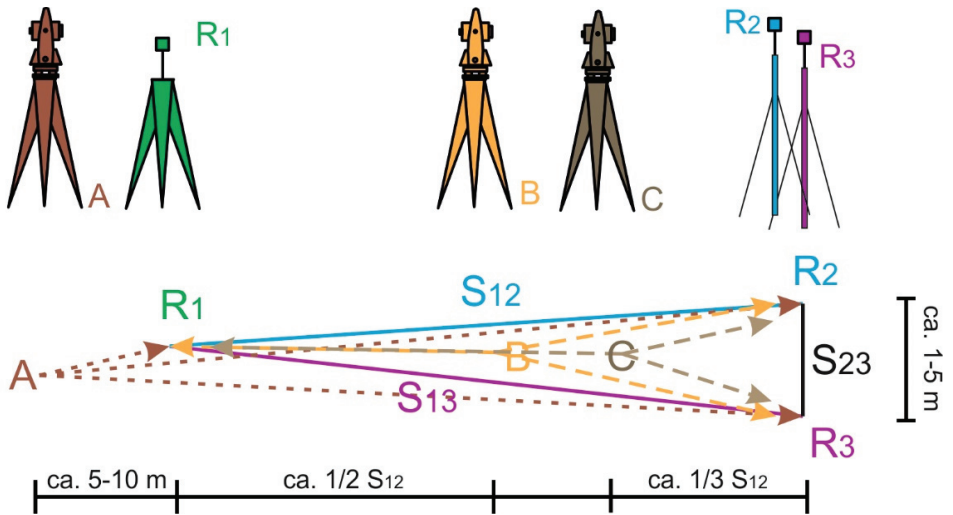


Abb. 55: Messanordnung zur Tachymeterprüfung.

Obwohl der Vorteil dieser Methode gerade darin liegt, dass das Testfeld in seiner Ausdehnung an die tatsächliche Arbeitssituation (z. B. auf einer Baustelle) angepasst werden kann und auch soll, wurden am GIK zwei Testfelder mit festinstallierten Aufnahmeeinrichtungen für Reflektoren realisiert. Eines davon hat eine Länge von 100 m und befindet sich im Freien an der Nordseite des Institutsgebäudes, ein weiteres hat eine Länge von 60 m und befindet sich in einem Gang im Untergeschoss des Institutsgebäudes (Aulabau) und ist damit zumindest witterungsunabhängig. Dieser Aufwand hat große Vorteile für die Verifizierung des Verfahrens und für die regelmäßige Überprüfung des Instrumentenparks des GIK: Der zeitliche Aufwand wird auf unter eine halbe Stunde pro Instrument reduziert, die Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse kann verifiziert werden und durch die stabile Position der Zielpunkte kann auch eine (grobe) Aussage zur Maßstabsstabilität des Instruments gemacht werden.

### 3.6 Untersuchungen an Reflektoren und deren mechanischer Adaption

Mit zunehmender Genauigkeit der polaren Messsysteme, insbesondere der Tachymeter, sowie der Verwendung von Lasertrackern in der Ingenieurvermessung gewinnen die optisch-mechanischen Eigenschaften der Reflektoren, vor allem bei Arbeiten im Nahbereich, zunehmend an Bedeutung für das Gesamtgenauigkeitsbudget der Koordinatenbestimmung.

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

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

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

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

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

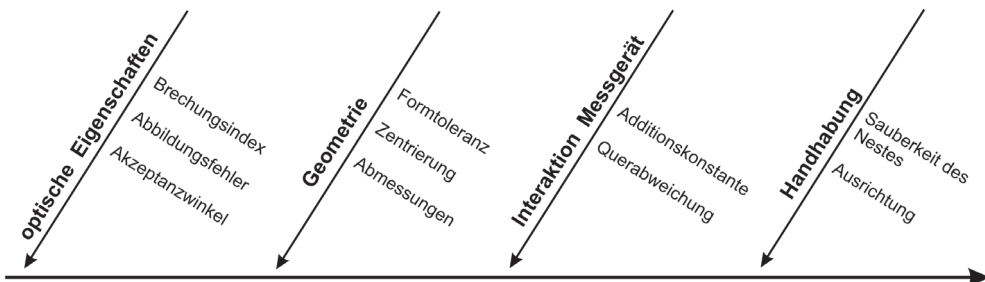


Abb. 56: Durch den Reflektor bedingte Einflüsse auf das Messergebnis.

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

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

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

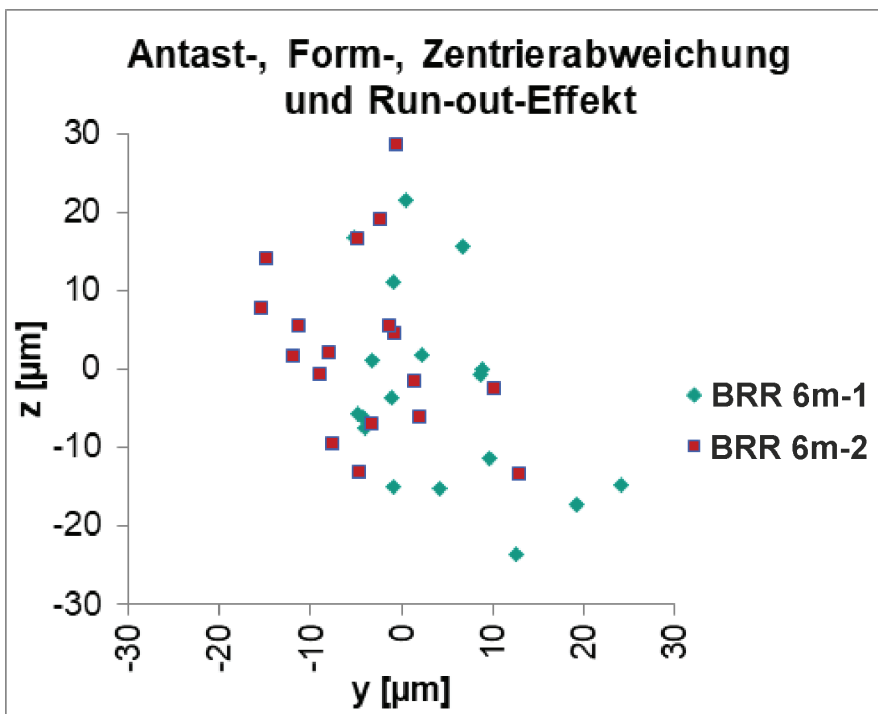
### **Die Aspekte A und B für Kugel-Prismen (2.b.)**

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

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

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

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



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

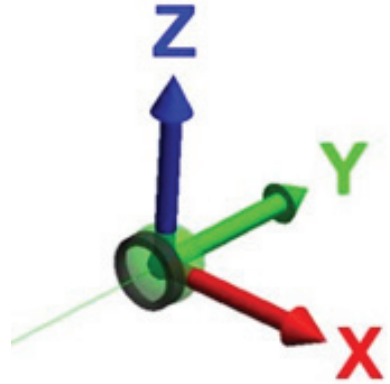
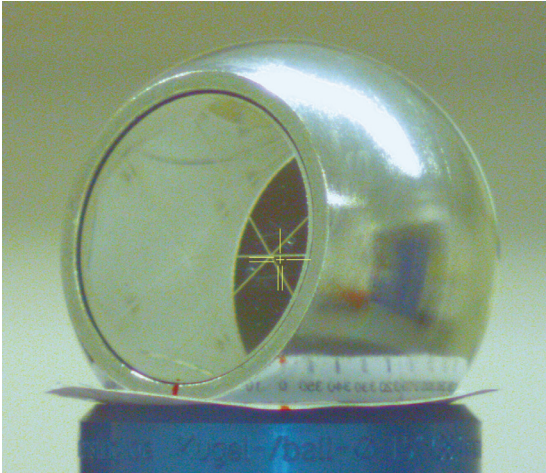


Abb. 58: Kugelprisma und Achsbezeichnungen.

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

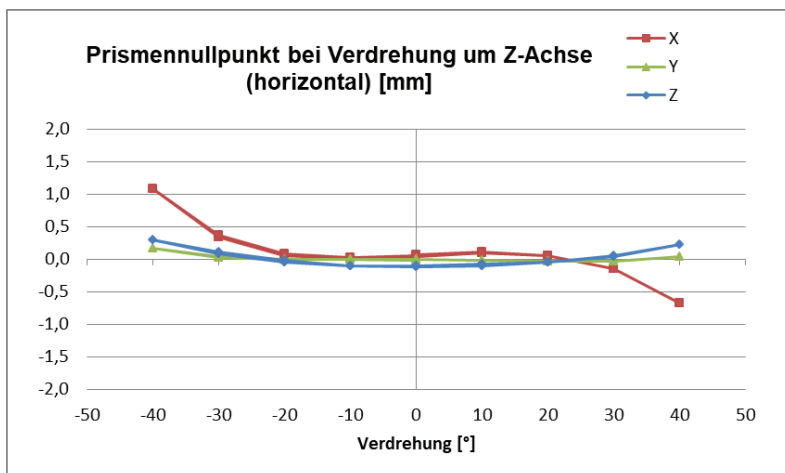
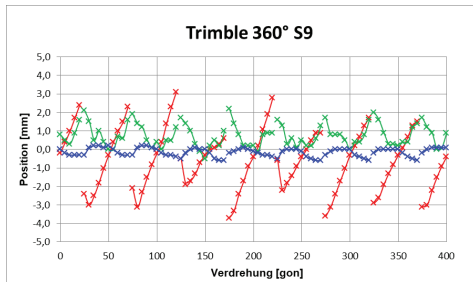
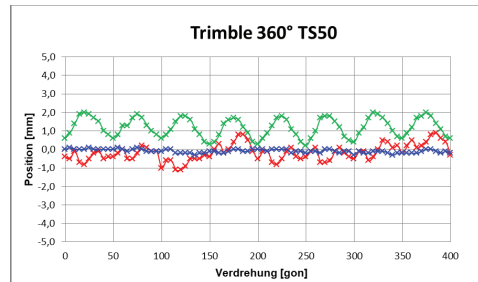


Abb. 59: Abweichungen bei Verdrehung eines 1,5"-Kugelreflektors mit 25 mm Glasprisma.



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



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

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

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

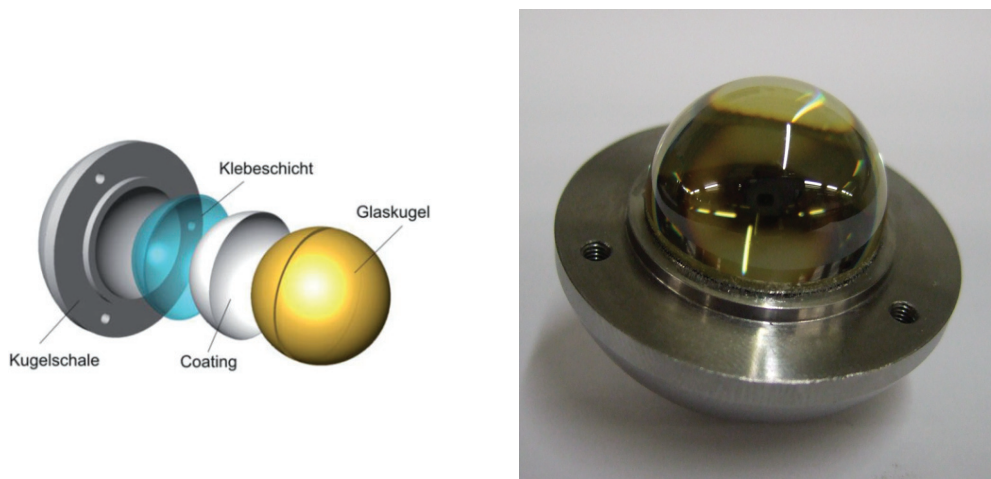
### Der Aspekt B für n2-Reflektoren (2.d.)

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

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

### Der Aspekt D für Kugelreflektoren (2.)

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



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

## **3.7 Freiformflächen**

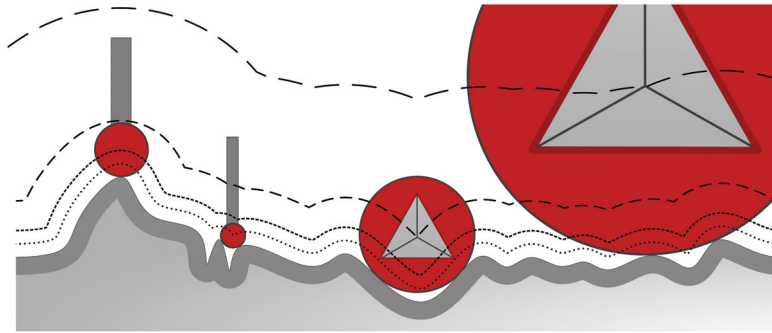
### **3.7.1 Motivation**

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

### **3.7.2 Taktile Messtechnik**

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

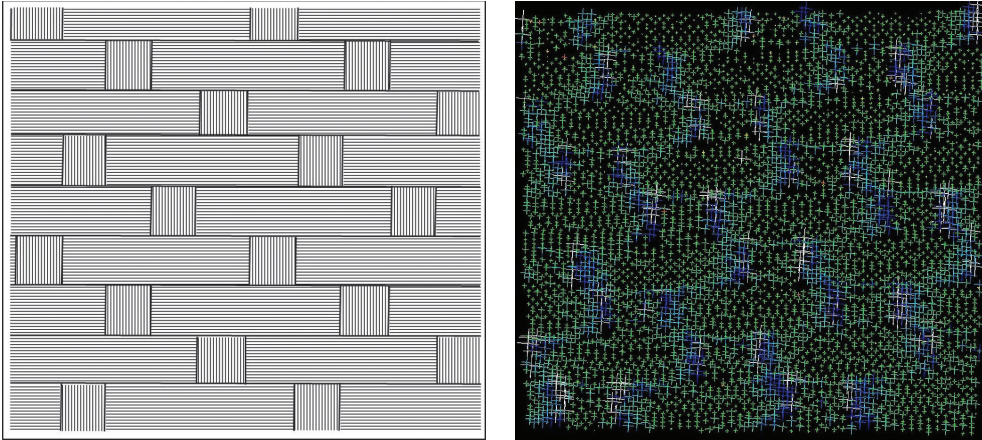




**Abb. 63:** Mechanische Filterwirkung beim taktilen Antasten von Freiformflächen in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser – exemplarisch für einen 3 mm und 6 mm Kugeltaster sowie für einen 0,5" bzw. 1,5" Kugelreflektor (vgl. Naab, 2016).

### 3.7.3 Optische Messtechnik

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

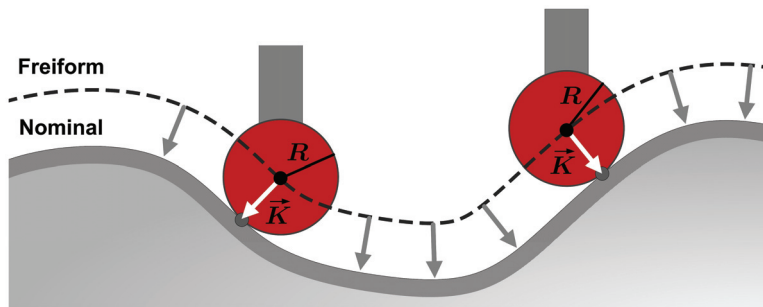


**Abb. 64:** Links: Schematische Darstellung des Aufbaus der Faserlagen eines CFK-Materials. Rechts: Systematische Abweichungen von der idealen Ebene aufgrund des Eindringens des Messstrahls des Laser Radars in das CFK-Material (Grün-Blau-Farbwechsel  $\approx 0,2$  mm) (vgl. Brencher und Naab, 2010).

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

### 3.7.4 Geometrische Modellierung

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



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

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

## 3.8 Präzisionsmesstechnik in der Ingenieurgeologie

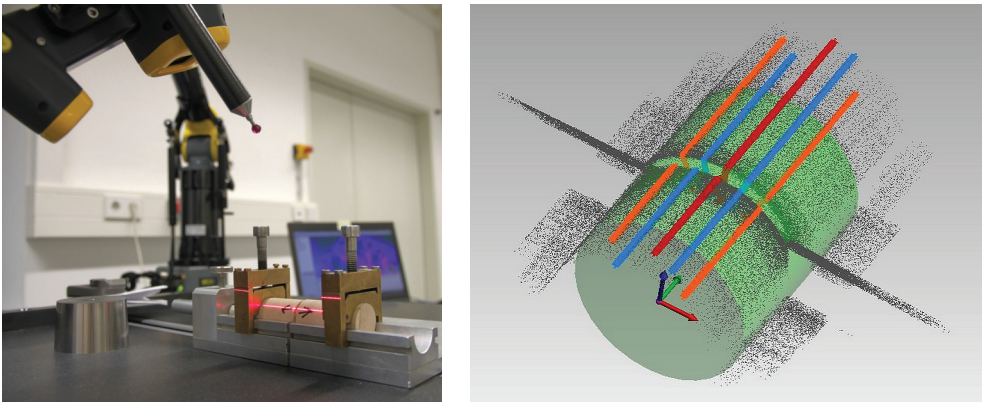
### 3.8.1 Motivation

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

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

### 3.8.2 Öffnungsweiten von Klüften

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



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

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

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

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

### 3.8.3 Rauheit von Trennflächen

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

## 3.9 Bestimmung des Verknüpfungsvektors zwischen Raumverfahren (Local Tie)

### 3.9.1 Motivation

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

### 3.9.2 Methodik

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



Abb. 67: Radioteleskop Wettzell.

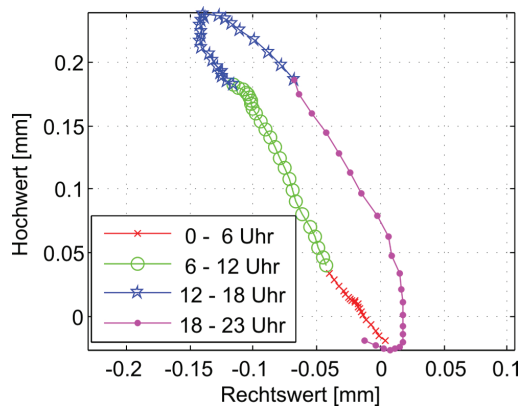


Abb. 68: Tagesverlauf des geometrischen Referenzpunktes des Radioteleskops Wettzell.

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

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

### 3.9.3 Realisierung

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

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

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

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

## 3.10 Präzisionsvermessungen am KATRIN-Experiment

### 3.10.1 Einleitung

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

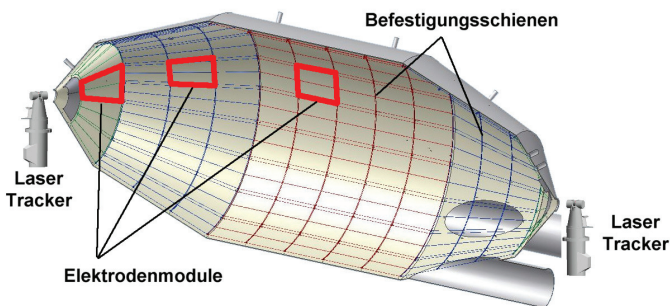


Abb. 69: Spektrometertank.



### 3.10.2 Arbeiten am Hauptspektrometertank

In der zentralen Apparatur dieses Experiments – dem mit einer Länge von 23 m, einem Durchmesser von 10 m und einem Volumen von  $1.250 \text{ m}^3$  weltgrößten Ultrahochvakuumtank (Abb. 69) – sollten 248 vorgefertigte hochempfindliche Elektrodenmodule eingebaut werden.

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

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

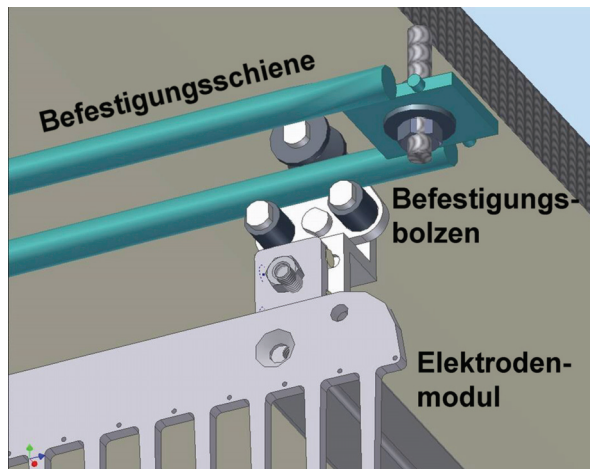


Abb. 70: Befestigung der Module.

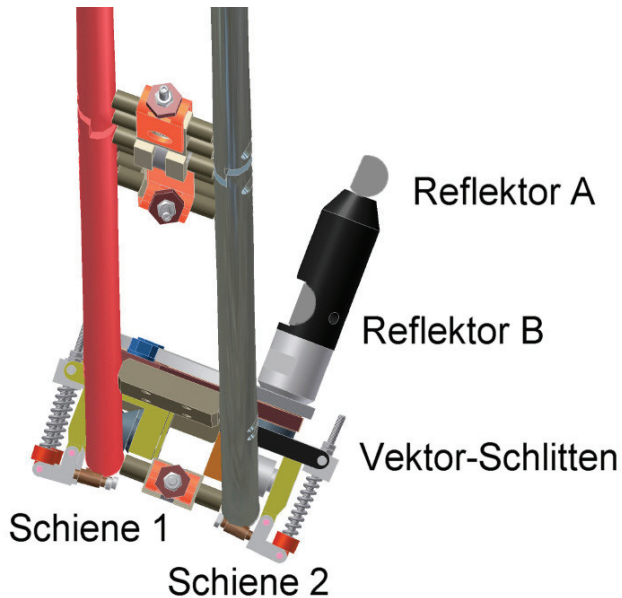


Abb. 71: Vektor-Schlitten mit Vektor-Bar.

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

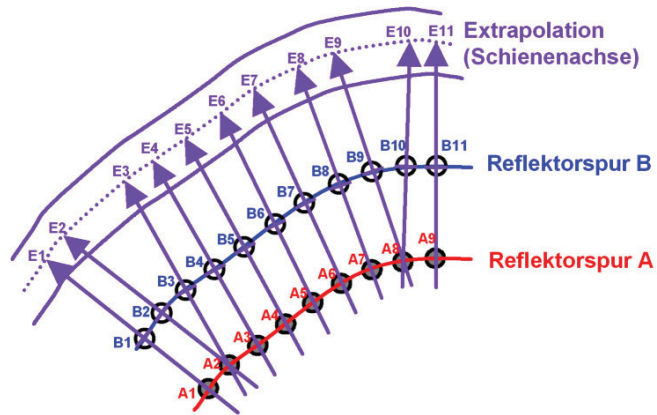


Abb. 72: Zuordnungsmethode.

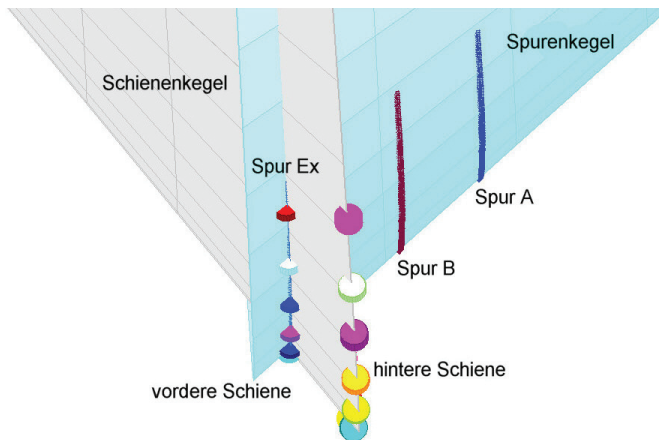


Abb. 73: Spurenkegel-Methode.

### 3.10.3 Posenbestimmung eines Magnetometers

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

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

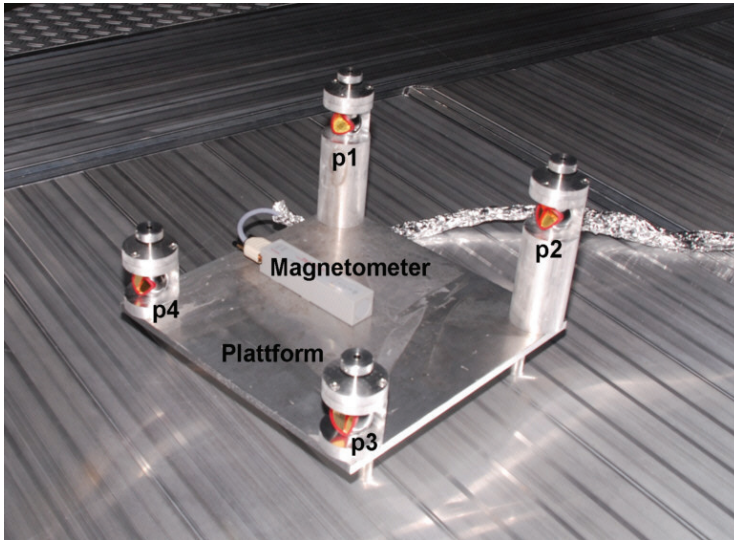


Abb. 74: Magnetometer-Plattform.

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

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

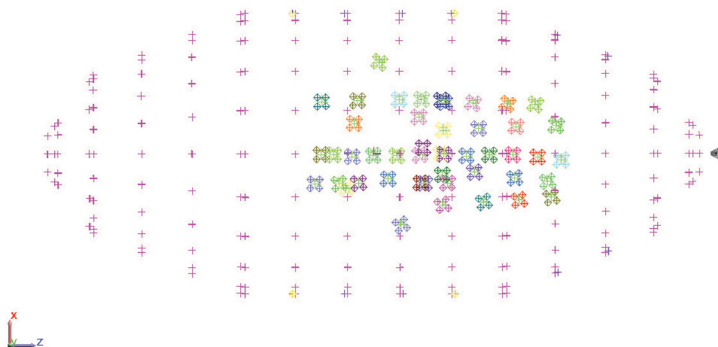


Abb. 75: Positionen der Magnetometer-Plattform (Grundriss).

## 3.11 Kooperierende Roboter

### 3.11.1 Motivation

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

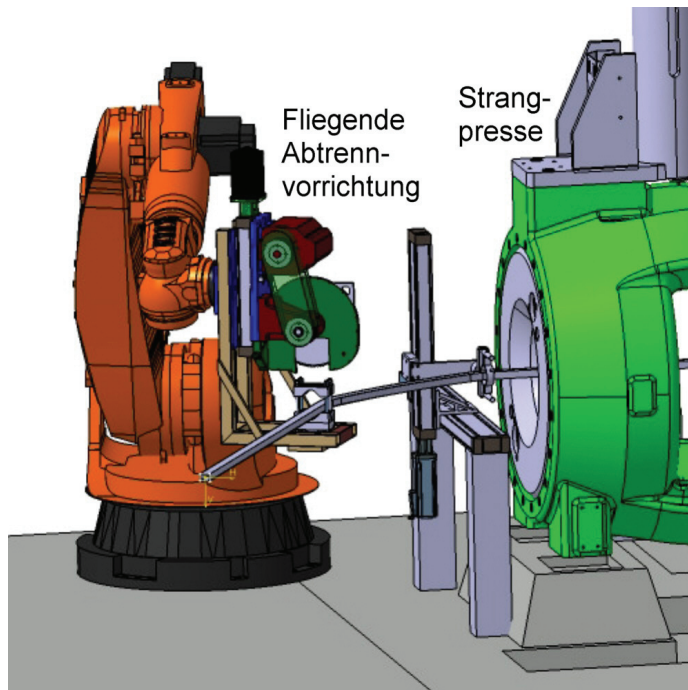


Abb. 76: Industrieroboter mit Strangpresse.

### 3.11.2 Messungen

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

### 3.11.3 Ergebnisse

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

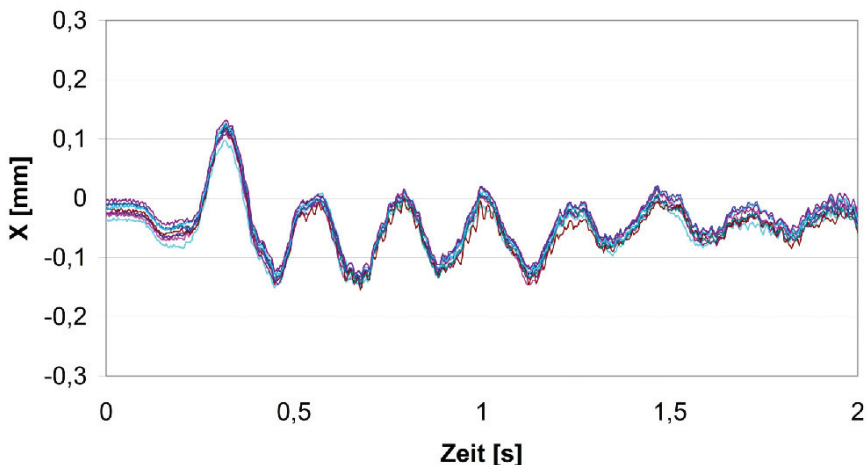


Abb. 77: Seitliche Abweichung.

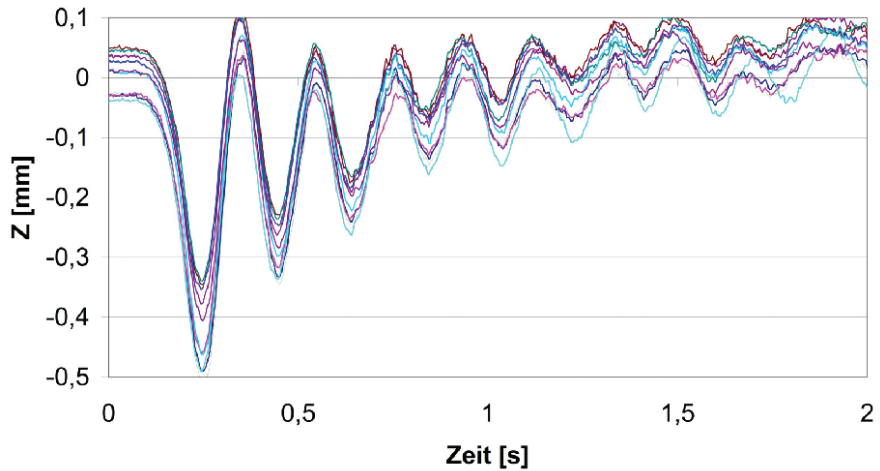


Abb. 78: Höhenabweichung.

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

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

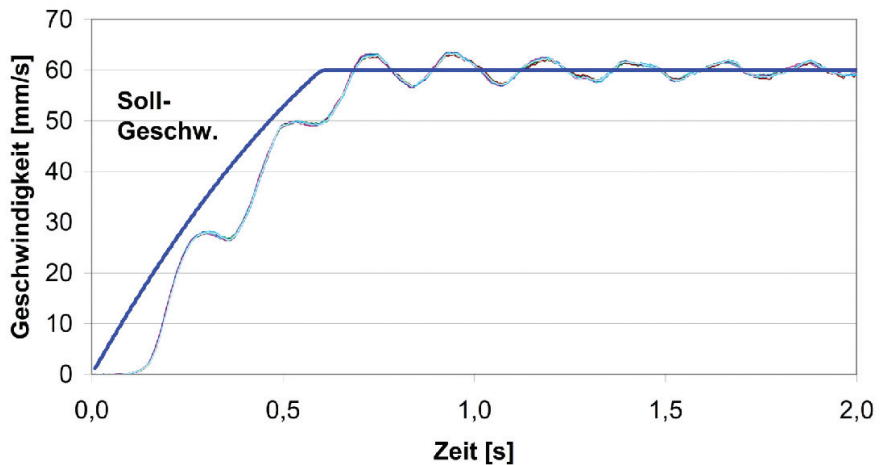


Abb. 79: Geschwindigkeiten.

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

## 3.12 Entwicklung eines Low-Cost-Systems zur hochpräzisen Posenbestimmung

### 3.12.1 Motivation

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

### 3.12.2 Konzept und Realisierung

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

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



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

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

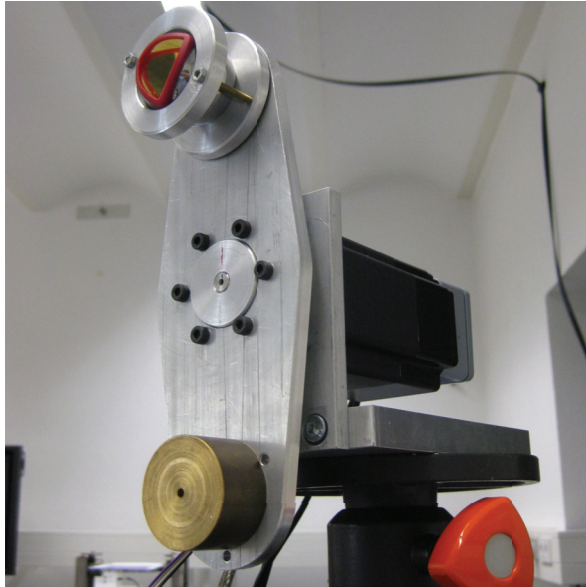
### **3.12.3 Erprobung**

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

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

### **3.12.4 Zukünftige Arbeiten**

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



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

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

## 3.13 Refraktion

### 3.13.1 Motivation

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

### 3.13.2 Turbulenztheorie – OTTM

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

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

### 3.13.3 Praktische Aspekte

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

## Literatur

- Abd-Elmotaal, H. A., Seitz, K., Abd-Elbaky, M. und Heck, B. (2016a): Tailored Reference Geopotential Model for Africa. In: *IAG 150 Years: Proceedings of the IAG Scientific Assembly in Postdam, Germany, 2013*. Hrsg. von C. Rizos und P. Willis. Cham: Springer International Publishing, S. 383–390. DOI: 10.1007/1345\_2015\_84.
- Abd-Elmotaal, H. A., Seitz, K., Kühtreiber, N. und Heck, B. (2016b): Establishment of the Gravity Database AFRGDB\_V1.0 for the African Geoid. In: *IGFS 2014*. Hrsg. von S. Jin und R. Barzaghi. Cham: Springer International Publishing, S. 131–138. ISBN: 978-3-319-39820-4.
- Abd-Elmotaal, H. A., Seitz, K., Kühtreiber, N. und Heck, B. (2018a): AFRGDB\_V2.0: The Gravity Database for the Geoid Determination in Africa. In: *IAGS 2018*. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, S. 1–10. DOI: 10.1007/1345\_2018\_29. URL: [https://doi.org/10.1007/1345\\_2018\\_29](https://doi.org/10.1007/1345_2018_29).

- Abd-Elmotaal, H. A., Seitz, K., Kühtreiber, N. und Heck, B. (2018b): Evaluation of the African Gravity Database AFRGDB\_V1.0. In: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–6. DOI: 10.1007/1345\_2017\_16. URL: [https://doi.org/10.1007/1345\\_2017\\_16](https://doi.org/10.1007/1345_2017_16).
- Alshawaf, F., Fuhrmann, T., Heck, B., Hinz, S., Knöpfler, A., Luo, X., Mayer, M., Schenk, A., Thiele, A. und Westerhaus, M. (2013): Integration of InSAR and GNSS Observations for the Determination of Atmospheric Water Vapour. In: *Earth Observation of Global Changes (EOGC)*. Hrsg. von J. M. Krisp, L. Meng, R. Pail und U. Stilla. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 147–162. ISBN: 978-3-642-32714-8. DOI: 10.1007/978-3-642-32714-8\_10. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32714-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32714-8_10).
- Alshawaf, F., Hinz, S., Mayer, M. und Meyer, F. J. (2015): Constructing accurate maps of atmospheric water vapor by combining interferometric synthetic aperture radar and GNSS observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(4):1391–1403. DOI: 10.1002/2014JD022419. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2014JD022419>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JD022419>.
- Anderson, E. G. (1976): The effect of topography on solutions of Stokes' problem. Unisurv S-14, Report. School of Surveying, University of New South Wales, Australia.
- Bernhart, F. (2010): Eigenschaften von Kugelreflektoren. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 173 S.
- Bernhart, F. und Hennes, M. (2012): Leistungsfähigkeit eines "Reflektor 160" in Kombination mit einem Lasertracker. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012(2):63–69.
- Bertels, M. (2018): Evaluierung der Leistungsfähigkeit einer Roboter-Totalstation zur Objektverfolgung in Echtzeit. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 78 S.
- Brencher, T. und Naab, C. (2010): Vermessung von CFK-Oberflächen mit einem Laserradar. In: 3. Fortbildungsseminar "Optische Messtechnik für Anwendungen im Maschinenbau", 14.10.2010, Karlsruhe.
- Breunig, M., Borrmann, A., Rank, E., Hinz, S., Kolbe, T., Schilcher, M., Mundani, R.-P., Jubierre, J. R., Flurl, M., Thomsen, A., Donaubaue, A., Ji, Y., Urban, S., Laun, S., Vilgertshofer, S., Willenborg, B., Menninghaus, M., Steuer, H., Würsthorn, S., Leitloff, J., Al-Doori, M. und Mazroobsemnani, N. (2017): Collaborative multi-scale 3D city and infrastructure modelling and simulation. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W4*:341–352. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-341-2017. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4-W4/341/2017/>.
- Brunner, F. K. und Hennes, M. (2014): Refraktion – Rückschau auf Publikationen der letzten 25 Jahre in der AVN. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2014(4):131–140.
- Depenthal, C. (2008): A Time-referenced 4D Calibration System for Kinematic Optical Measuring Systems. In: Proceedings of the 1st Conf. Machine Control & Guidance, June 24-26, 2008, ETH Zurich, CH.
- Depenthal, C. (2009a): Entwicklung eines zeitreferenzierten 4-D Kalibriertsystems für optisch kinematische Messsysteme. *Veröffentlichungen der DGK, Reihe C*, no. 627. Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: <http://dgk.badw.de/index.php?id=12,%20http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000010086>.
- Depenthal, C. (2009b): On Analyzing Delay Times of Kinematic Optical Measuring Systems with Quaternion-Algebra. In: Grün, A., und Kahmen, H. (Hrsg.) IEEE Proceedings Eurocon, Optical 3-D Measurement Techniques IX, Vol. II, Jul. 1-3, 2009, Vienna, Austria. S. 105–114.
- Depenthal, C. (2009c): Quaternion-Based Delay Time Determination for Kinematic Optical Measuring Systems. In: IEEE Proceedings Eurocon, 18.-23. Mai 2009, Saint Petersburg, Russia. S. 1139–1144. ISBN: 978-1-4244-3861-7.
- Depenthal, C. (2010a): iGPS used as kinematic measuring system. FIG, 2010. URL: [https://www.gik.kit.edu/downloads/iGPS\\_FIG2010\\_Depenthal.pdf](https://www.gik.kit.edu/downloads/iGPS_FIG2010_Depenthal.pdf) (besucht am 06.05.2018).
- Depenthal, C. (2010b): Path Tracking with iGPS. In: Int Conf Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 15-17 Sept. 2010. S. 1–6.
- Depenthal, C. (2012): Die kinematische Leistungsfähigkeit des iGPS. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2012:70–72.
- Depenthal, C. und Barth, M. (2007): Zur Leistungsfähigkeit eines zeitreferenzierten Dreharms als Prüfmittel für 4D-Messsysteme in Hochgeschwindigkeitsanwendungen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(7):244–249.
- DVW AK 3 und 4 (2017): Ein einfaches Feldprüfverfahren für Tachymeter. Fachautor: Manfred Juretzko, Karlsruher Institut für Technologie. URL: <https://www.dvw.de/merkblatt> (besucht am 21.05.2018).
- Eschelbach, C. (2003): Bestimmung des IVS-Referenzpunktes am Onsala Raumobservatorium. *Mitteilungen, DVW Baden-Württemberg e.V. Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 50(1):203–207.

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

- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2015): RWI\_TOPO\_2015: An update of the Rock-Water-Ice topographic gravity field model of the Earth up to degree and order 2190. IUGG, Prague, 22. Juni-02. Juli 2015.
- Grombein, T., Seitz, K. und Heck, B. (2016): Height System Unification Based on the Fixed GBVP Approach. In: Rizos, C., und Willis, P. (Hrsg.) IAG 150 Years, Cham: Springer International Publishing, S. 305–311. ISBN: 978-3-319-30895-1.
- Günther, A. (2009): Eigenschaften der Linearmessbahn im kinematischen Betrieb. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 145 S.
- Hale, S. (2014): Bestimmung der Öffnungsweite von Klüften durch 3D-Laserscanning – Anwendbarkeit und Grenzen. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe, Institut für Angewandte Geowissenschaften Karlsruhe – KIT.
- Härter, N. (2016): Rekonstruktion von äquivalenten Wassersäulen aus einem inversen Tesseroidansatz in einer closed-loop Simulation. Bachelorarbeit, unveröffentlicht, Geodätisches Institut Karlsruhe – KIT, 64 S.
- Heck, B. und Seitz, K. (2007): A comparison of the tesseroid, prism and point-mass approaches for mass reductions in gravity field modelling. *Journal of Geodesy* 81(2):121–136. DOI: 10.1007/s00190-006-0094-0.
- Hennes, M. (2002): Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung. *fub – Flächenmanagement und Bodenordnung* 2002.
- Hennes, M. (2006a): Das Nivelliersystem-Feldprüfverfahren nach ISO 17123-2 im Kontext refraktiver Störeinflüsse. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 119(3):85–94.
- Hennes, M. (2006b): Zur Flächenrückführung mit Lasertrackern. In: Beitrag zum 72. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning (TLS 2006), vol. 51. 09.-10. November 2006, Fulda. Schriftenreihe des DVW, S. 201–212.
- Hennes, M. (2007a): Flächenerfassung mit Lasertrackern als Alternative zu scannenden Verfahren. In: 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag, Berufliche Weiterbildung (BWB) Industriemesstechnik, TU Dresden, Geodätisches Institut, 01.06.2007. S. 59–65.
- Hennes, M. (2007b): Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(4):136–146.
- Hennes, M. (2009): Freiformflächenerfassung mit Lasertrackern – eine ergonomische Softwarelösung zur Reflektoroffsetkorrektur. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2009(5):188–194.
- Hennes, M. (2010): Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik. In: Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswertverfahren, vol. 61. 93. DVW-Seminar, 10./11. Juni 2010, Hannover. S. 239–252. ISBN: 978-3-89639-742-3.
- Hennes, M. (2013): Zum Umgang mit Unsicherheiten bei geodätischen Mess- und Auswertverfahren. In: Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswertverfahren, vol. 71. Beiträge zum 125. DVW-Seminar, 24./25.6.2013, Hannover. Wissner-Verlag, S. 25–46. ISBN: 978-3-89639-917-5.
- Hennes, M. und Eschelbach, C. (2004): New Technologies For The Real 3D Reference Point Determination. In: Proc. 3rd IVS General Meeting, 9.-11.2.2004, Ottawa/Canada. URL: [https://www.gik.kit.edu/downloads/hennes\\_eschelbach\\_2004\\_pr.pdf](https://www.gik.kit.edu/downloads/hennes_eschelbach_2004_pr.pdf) (besucht am 29.06.2018).
- Hennes, M., Haas, R. und Eschelbach, C. (2004): Industriemesstechnik zur Qualitätssteigerung von VLBI-Ergebnissen. In: Ingensand, H. (Hrsg.) XIV, Kurs für Ingenieurvermessung, 15.-19.3.2004, Zürich. S. 107–118.
- Hennes, M. und Heister, H. (2007): Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2007(11-12):375–383.
- Hennes, M. und Juretzko, M. (2008): Measuring the motion – Synchronizing a laser tracker for high-accuracy handling tasks. *Journal of CMSC* 4:23–28.
- Hennes, M. und Richter, E. (2008): A-TOM – eine neuartige instrumentelle Lösung für die hochpräzise und echtzeitnahe 6DOF-Bestimmung. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 115(8-9):301–310.
- Hennes, M. und Richter, E. (2009): Ein neuartiges Verfahren zur 6DOF-Bestimmung. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. S. 254–261.
- Hennes, M., Urban, M. und Wursthorn, S. (2014): Zur Synchronisierung von Multi-Sensor-Systemen – Grundlagen und Realisierungen. In: Beiträge zum 138. DVW-Seminar, vol. 75. 18./19. September 2014, Hamburg.
- Herrmann, C., Hennes, M., Juretzko, M., Schneider, M. und Munzinger, C. (2010): Positioning and Synchronization of Industrial Robots. In: Mautz, R., Kunz, M., und Ingensand, H. (Hrsg.) Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 18./19. September 2014, Hamburg. IEEE Xplore, S. 436–440.
- Herrmann, C., Lösler, M. und Bähr, H. (2011): Comparison of Spatial Analyzer and Different Adjustment Programs. In: Proc. 1st International Workshop on Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems, 13.-15. April

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

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



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