

FORSCHUNGS- GRUPPE SATELLITEN- GEODÄSIE



**Forschungs- und Entwicklungs-
programm 2016-2020**

Forschungsgruppe Satellitengeodäsie

FGS

Forschungs- und Entwicklungsprogramm

2016 – 2020

**München, Frankfurt, Bonn
Mai 2015**

Abbildungen auf der Titelseite: Twin Radioteleskope am Geodätischen Observatorium Wettzell

Vorwort

Das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsprogramm stellt die Forschungsziele und Aufgaben der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) für die Jahre 2016 bis 2020 zusammen. Das Forschungsprogramm wird in Abständen von fünf Jahren überarbeitet und neuen Gegebenheiten angepasst. In wesentlichen Teilen schreibt das neue Forschungsprogramm Aufgaben aus dem Vorgängerprogramm fort, wobei neue Entwicklungen aus der Sensorik und Messtechnik sowie Methodik und Modellierung aufgenommen und integriert werden. Satzungsgemäß steht der Betrieb des Geodätischen Observatoriums Wettzell und dessen weitere Entwicklung, die sachgerechte Analyse und Bereitstellung der Messresultate sowie deren geodätische und geowissenschaftliche Nutzung in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit den Geowissenschaften im Kontext der Aufgaben des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems (GGOS) im Fokus. Mit den Forschungsarbeiten sollen signifikante Beiträge geleistet und Impulse gesetzt werden zu der Realisierung eines konsistenten integrierten Raumbezugs als metrologische Grundlage aller geometrischer und gravimetrischer Georeferenzierung, insbesondere zur Erfassung und Interpretation der Prozesse des globalen Wandels. Eine Vorreiterrolle übernehmen will die FGS auch in der Nutzung von Zeit und Frequenz an geodätischen Observatorien in Hinblick auf eine zukünftige relativistische Geodäsie. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der FGS orientieren sich an den internationalen Entwicklungen und werden in internationale Programme und wissenschaftliche Dienste eingebunden. Alle fünf Jahre wird das Forschungsprogramm von einem Gremium aus nationalen und internationalen Experten begutachtet und auf seine Konsistenz und Zukunftsfähigkeit überprüft. Zwischen den Begutachtungen findet jeweils anlässlich eines Workshops eine Standortbestimmung der laufenden Arbeiten im Vergleich zum laufenden Forschungsprogramm statt.

Seit der letzten Begutachtung im Juni 2010 haben sich im Führungskreis mehrere wichtige Änderungen ergeben. Am 1. Mai 2011 wurde Prof. Hansjörg Kutterer als Nachfolger von Prof. Dietmar Grünreich als Präsident des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) ernannt. Am 15. Januar 2013 konnte die zentrale Position des Stationsleiters in Wettzell durch Prof. Torben Schüler besetzt werden. Am 1. August 2012 hat Prof. Florian Seitz die Leitung des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI) und des Lehrstuhls für Geodätische Geodynamik an der Technischen Universität München (TUM) übernommen. Schließlich hat am 1. April 2013 Dr. Daniela Thaller die Nachfolge von Dr. Bernd Richter als Referatsleiterin Referatsleiterin G1 Grundsatz, Kombination Raumverfahren am BKG angetreten. Auch bei den von der FGS betriebenen Observatorien ergibt sich eine wichtige Änderung: Nachdem für den Betrieb von TIGO mit CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) in Argentinien ein neuer Partner gefunden wurde, ist das transportable geodätische Observatorium nach aufwändigen Vorbereitungsarbeiten im April 2015 von seinem alten Standort in Concepción in Chile auf dem Landweg nach La Plata in Argentinien transportiert worden. Es wird dort gegenwärtig wieder aufgebaut und unter dem Namen Argentinian-German Geodetic Observatory (AGGO) in Betrieb genommen.

In Folge der Strukturevaluation der durch den Freistaat Bayern finanzierten nichtuniversitären Forschungseinrichtungen im Jahre 2012 wurde das DGFI am 1. Januar 2015 in den Lehrstuhl für Geodätische Geodynamik an der TUM integriert. Es trägt seither den Namen Deut-

sches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM). Im selben Zusammenhang wurde auch das am 28. Oktober 2010 gegründete Centrum für Geodätische Erdsystemforschung (CGE) als Zusammenschluss von IAPG, DGFI, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der TUM und der geodätischen Abteilung der Bayerischen Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften aufgelöst. Schließlich wurden im Zuge einer Reorganisation im Nachgang zur Begutachtung der Ingenieur fakultät Bau, Geo, Umwelt der TUM die Institute der Fakultät aufgelöst, womit formal auch das Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG) seit dem 1.1.2015 nicht mehr existiert. Die Rechtsnachfolge auch im Rahmen der FGS übernimmt der Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie (APG) von Prof. Pail. Trotz der strukturellen Veränderungen der geodätischen Landschaft in München kann damit die Struktur der FGS unangetastet bleiben und die jahrzehntelange vorbildliche Kooperation der in der FGS zusammengeschlossenen Institutionen kann in derselben Form in die Zukunft geführt werden.

Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie ist für die anhaltend hohe Förderbereitschaft der zuständigen Ministerien des Bundes und der Länder dankbar, welche insbesondere Betreib und Weiterentwicklung der Geodätischen Observatoriums Wettzell, aber auch von TIGO/AGGO und O'Higgins erst möglich macht und ohne deren Unterstützung das Erreichen der gesteckten Ziele nicht denkbar wäre.

Darüber hinaus dankt die FGS dem Gutachtergremium für seine sehr wertvollen Ratschläge zum Programm der zurückliegenden Jahre und für seine Bereitschaft zur diesjährigen Begutachtung.

München, im Mai 2015

Urs Hugentobler

- Sprecher -

Vision

Das Geodätische Observatorium Wettzell ist eine präzise und integrierte Referenz für alle nationalen und internationalen Anwendungen mit Raumbezug und zur Interpretation von Veränderungsprozessen im System Erde.

Mission

Die FGS betreibt das Geodätische Observatorium Wettzell und baut dieses im internationalen Zusammenspiel unter Nutzung der neuesten technologischen und methodischen Entwicklungen aus. Sie stellt über die wissenschaftlichen Dienste der IAG hochwertige Messzeitreihen zur Verfügung, analysiert, kombiniert und interpretiert die Daten und entwickelt die entsprechenden methodisch-theoretischen Grundlagen als Beitrag zur geodätischen Erdsystemforschung weiter. Sie gestaltet dadurch die internationalen Aktivitäten und den wissenschaftlichen Fortschritt auf diesen Gebieten entscheidend mit.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung		7
1 Einführung		11
1.1 Globale Veränderungsprozesse und GGOS		11
1.2 Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie		14
1.3 Das Geodätische Observatorium Wettzell		15
2 Bilanz im Kontext des laufenden Forschungsprogramms		17
2.1 Messsysteme der FGS		17
2.2 Informationstechnologie, Datenaufbereitung und -archivierung		22
2.3 Methodische Grundlagen und Verfahren		23
2.4 Verbindung mit Erdwissenschaften		26
2.5 Beteiligung der FGS an den Internationalen Diensten		27
3 Forschungsprogramm 2016-2020		29
Schwerpunkt 1 Raumbezug		33
Objective 1 GGOS-Konformität des Geodätischen Observatoriums Wettzell.....		33
Objective 2 Weiterentwicklung der geodätischen VLBI im Rahmen von VGOS		36
Objective 3 Integrierte Nutzung der Daten des GREF-Stationsnetzes		38
Objective 4 Konsistente Verknüpfung der Messsysteme und Raumverfahren		40
Objective 5 Konsistente Realisierung eines integrierten Raumbezuges.....		44
Objective 6 Nutzung neuer Messsysteme und Beobachtungstechniken		46
Objective 7 Einbindung des G-Ringlasers in die Bestimmung von Erdrotationsparametern.....		46
Objective 8 Konsistente Integration und konsequente Nutzung von Zeit und Frequenz in den Weltraumverfahren		48
Schwerpunkt 2 Monitoring geophysikalischer Prozesse.....		51
Objective 1 Verbesserte Erfassung und Modellierung der atmosphärischen Zustandsgrößen über Wettzell		52
Objective 2 Monitoring und Modellierung von Deformationen in der Region Wettzell		53
Objective 3 Korrektur atmosphärischer und hydrologischer Attraktionseffekte auf Gravimeter und Tiltmeter		54
Objective 4 Monitoring des statischen und zeitvariablen Schwerfeldes.....		55
Objective 5 Monitoring von Deformationsprozessen auf unterschiedlichen Skalen ...		58
Objective 6 Dynamische Prozesse im Erdsystem		60

Schwerpunkt 3	Infrastruktur.....	65
Objective 1	Operationeller Messbetrieb im Rahmen der internationalen Dienste der IAG.....	66
Objective 2	Aktive Beteiligung in den Diensten der IAG	68
Objective 3	Standardisierung für einen konsistenten Raumbezug.....	68
Objective 4	Automatisierung.....	70
Objective 5	Weiterentwicklung der geodätischen VLBI im Rahmen von VGOS	72
Objective 6	Einheitliche Zeitbasis an den geodätischen Observatorien	74
Objective 7	Erweiterung des Sensornetzwerks um Wettzell	76
Objective 8	Sicherung von Nachhaltigkeit und Stabilität des GREF-Stationsnetzes und Qualität der Beobachtungsdaten.....	77
Objective 9	Sicherstellung der Schwerereferenz für Deutschland	79
Objective 10	Datenhaltung und Bereitstellung der Mess- und Modellzeitserien	81
Anhang A	Verantwortungsbereiche innerhalb der FGS.....	83
Anhang B	Instrumentelle Ausstattung der Observatorien der FGS.....	85
Anhang C	Haushaltsmäßige Absicherung des Programms	87
Anhang D	Beteiligung der FGS an den internationalen Diensten	95
Anhang E	Zitierte Literatur.....	98
Anhang F	Verwendete Abkürzungen	99

Zusammenfassung

Veränderungsprozesse im System Erde wie etwa der Anstieg des mittleren Meeresspiegels stellen eine große Herausforderung an die Gesellschaft dar. Unabdingbar zu deren Bewertung ist ein detailliertes Verständnis der Prozesse in und der Wechselwirkung zwischen den Komponenten des Systems Erde. Grundlage hierfür sind präzise Messungen in einheitlichen, präzisen und langzeitstabilen geometrischen und gravimetrischen Referenzsystemen. Hier spielt die Geodäsie heute eine zentrale Rolle. Mit den raumgeodätischen Messverfahren, den Altimeter- und Schwerefeld-Satellitenmissionen, mit präzisen terrestrischen Verfahren sowie mit den entsprechenden Datenverarbeitungs- und Analysemethoden liefert sie das instrumentelle und methodische Rüstzeug zur Schaffung der metrologischen Basis für die Erfassung, Beschreibung und Interpretation dieser Prozesse. Um die erforderlichen Ziele betreffend Genauigkeit und Stabilität zu erreichen, ist eine weitgehende Integration der verschiedenen geodätischen Techniken und Methoden zwingend erforderlich. Ausgehend von dieser Erkenntnis baut die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG) das Global Geodetic Observing System (GGOS) auf.

Eine zentrale Komponente von GGOS sind global verteilte geodätische Fundamentalstationen, welche die geodätischen Raumverfahren an einem Observatorium ko-lokieren, um deren konsistente Kombination zu ermöglichen. Das Geodätische Observatorium Wettzell ist der Prototyp eines solchen Observatoriums. Abgesehen noch von DORIS werden dort alle wichtigen Weltraum- und terrestrischen Verfahren an einem Ort betrieben. Darüber hinaus ist das Observatorium ein zentrales Element der nationalen geodätischen Infrastruktur Deutschlands, welches den nahtlosen Anschluss an die Georeferenzsysteme der Nachbarländer sichert. Das Observatorium wird im Rahmen der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) betrieben, welche 1983 als Nachfolgeorganisation des DFG Sonderforschungsbereichs SFB 78 gegründet wurde. Gemäß Satzung umfassen die Aufgaben der FGS Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der geodätischen Raumverfahren, insbesondere zur langfristigen Sicherstellung des Betriebs des Geodätischen Observatoriums Wettzell und dessen weiteren Ausbaus auf hohem wissenschaftlich-technischem Niveau. Ebenso im Fokus der Arbeiten ist die geodätische Nutzung der Messdaten und die Weiterentwicklung der entsprechenden Methoden und Modelle, aber auch die Interpretation der Resultate in enger Zusammenarbeit mit den verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen.

Das Forschungsprogramm gliedert sich in drei thematische Schwerpunkte – Raumbezug, Monitoring geophysikalischer Prozesse, Infrastruktur –, welchen jeweils zwei übergeordnete Ziele zugeordnet sind. Aus diesen Zielen werden eine Reihe von Zielstellungen abgeleitet, aus welchen sich jeweils mehrere Aufgaben ergeben, die in der nächsten Projektperiode 2016-2020 bearbeitet werden sollen. Diese Schwerpunkte sind eng miteinander verknüpft und mehrere Zielstellungen und Aufgaben stellen Querbezüge zwischen den drei Schwerpunkten her. Kernthemen wie etwa die geodätische Nutzung von Zeit und Frequenz an geodätischen Observatorien in Hinblick auf eine zukünftige relativistische Geodäsie finden sich in mehreren der Schwerpunkte wieder.

- *Schwerpunkt 1: Raumbezug*

Mit ihren Forschungsvorhaben will die FGS die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Einzelverfahren sichern und weiter erhöhen sowie signifikant beitragen zur Weiterentwicklung der Modellbildung und Standardisierung für einen konsistenten integrierten Raumbezug durch Kombination von geometrischen und gra-

vimetrischen Verfahren und Analysemethoden. Daraus ergeben sich die folgenden Ziele mit zugeordneten Aufgaben:

Die *GGOS-Konformität* des Geodätischen Observatoriums soll erreicht werden durch eine verbesserte Bestimmung der lokalen Verbindungsvektoren, einerseits durch Optimierung des lokalen Vermessungsnetzes und Analyseverfahren und der Schaffung spezieller „Kombi-Punkte“, andererseits durch Integration von lokalen Schweremessungen.

Im Rahmen des VLBI Global Observing Systems (VGOS) soll *geodätische VLBI* weiterentwickelt werden durch die Implementation der Breitband-Empfangstechnik und der Realisierung von Konzepten zur gemeinsamen Nutzung der drei Radioteleskope als Array. Für das 20m-Radioteleskop soll ein Fortführungskonzeptes entwickelt werden.

Die Daten des *geodätischen Referenznetzes Deutschlands* (GREF) sollen nach neuesten Standards unter Einbezug der neuen Satellitensysteme reprozessiert werden. Zusammen mit der Wiederholungsmessung des deutschen Nivellementnetzes sowie Schweremessungen soll die Untersuchung der Ursachen von Krustenänderungen angegangen werden.

Die konsistente *Verknüpfung der Messsysteme und Raumverfahren* wird angestrebt durch die Weiterentwicklung der Methodik zur Nutzung des gesamten Potenzials der Ko-Lokation der Messverfahren am Boden wie im Weltraum. Über Satellitenbahnen soll die Verknüpfung zwischen Geometrie und Schwerfeld hergestellt werden. Schließlich sollen das himmelsfeste und das erdfeste Referenzsystem konsistent realisiert und neue Konzepte zur Handhabung nichtlinearer Stationsbewegungen entwickelt werden.

Zur Realisierung eines *integrierten Raumbezuges* für die Höhe in Deutschland sollen GNSS- und Nivellementpunkte konsistent kombiniert und zur Bestimmung von Geoid- und Quasigeoidmodellen genutzt werden.

Neue Messsysteme und Beobachtungstechniken sollen genutzt resp. untersucht werden wie Multi-GNSS-Beobachtungen, präzise GNSS-Zwischensatelliten-Distanzmessungen und DORIS-Phasenbeobachtungen oder von Polarisationsmessungen zur Verbesserung der Massenzentrumskorrektur bei SLR-Satelliten.

Der ungestörte Betrieb des *Grossringlasers* zur Bestimmung von Erdrotationsparametern soll fortgeführt und die Daten mit VLBI und GNSS kombiniert werden. Die Optimierung lokaler Korrekturmodelle soll die Stabilität weiter erhöhen. Schließlich beteiligt sich die FGS zusammen mit Partnern am Aufbau weiterer Ringlaser.

Zeit und Frequenz sollen in den Weltraumverfahren konsistent integriert und genutzt werden. Uhrenparameter sollen als gemeinsame Parameter zur lokalen Verknüpfung und zur Aufdeckung technikspezifischer systematischer Fehler beitragen. Mittelfristig sollen Konzepte zur relativistischen Geodäsie entwickelt werden.

- **Schwerpunkt 2. Monitoring geophysikalischer Prozesse**

Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst Monitoringaufgaben, welche einerseits lokale Prozesse im näheren Umfeld des Geodätischen Observatoriums zur Entwicklung geeigneter Korrekturmodelle im Fokus haben, andererseits die Quantifizierung geophysikalischer Phänomene im Erdsystem in engem Kontakt mit den Geowissenschaften zum Ziel haben. Daraus ergeben sich die folgenden Ziele mit zugeordneten Aufgaben:

Die *atmosphärischen Zustandsgrößen* über dem Observatorium sollen durch Erweiterung des Footprintnetzes besser erfasst und

modelliert werden. Die durch die verschiedenen Sensoren erfassten atmosphärischen Informationen sollen für die Datenanalyse konsequent genutzt werden.

Mithilfe von punktwise und flächenhaft messenden geodätischen Verfahren sowie mit hochaufgelösten Schweremessungen sollen *regionale Deformationen* erfasst werden. Gravimetrische und geometrische Überwachungsmessungen sollen kombiniert und zur integralen Modellierung von Veränderungsprozessen genutzt werden.

Hydrologische Umweltparameter sollen am Geodätischen Observatorium Wettzell kontinuierlich erfasst und Korrekturen für Gravimeter und Tiltmeter abgeleitet werden. Die automatische Berechnung atmosphärischer Korrekturen soll auf alle Stationen des Global Geodynamics Project (GGP) angewendet werden.

Zur Modellierung des *statischen und zeitvariablen Schwerfeldes* sollen Satelliten-Beobachtungszeitreihen analysiert und die Methodik, Stochastik und Numerik zur Berechnung zeitlich und räumlich hochauflösender Schwerfelder weiterentwickelt werden. Dabei sollen Schwerfeldbeobachtungen aus Schwerfeldmissionen, terrestrischen Schweremessungen und Satellitenaltimetrie kombiniert werden. Zudem sollen Konzepte neuer Satellitenmissionen simuliert und weitere Anwendungsstrategien zur Nutzung globaler und regionaler Schwerfelder in der geophysikalischen Erdmodellierung entwickelt werden.

Deformationsprozesse sollen auf regionalen und globalen Skalen untersucht werden. Die Zeitreihenanalysen sollen zur Validierung und Verbesserung nicht-gezeiteninduzierter Auflasteffekte genutzt werden. GNSS und absolute SAR-Beobachtungen sollen zur flächenhaften Erfassung zeitlicher Veränderungen in der Geländetopographie kombiniert werden.

Wichtige Forschungsaufgaben der FGS beschäftigen sich mit der Beobachtung und Beschreibung *dynamischer Prozesse im Erdsystem*. Es sollen Wasserstandshöhen und Speichervariationen von Inlandgewässern, Massenvariationen von Eisschilden, Meeresspiegelvariationen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen sowie atmosphärische Parameter von Ionosphäre und Troposphäre mittels Kombination verschiedener geodätischer Messtechniken beobachtet, analysiert und modelliert werden.

- **Schwerpunkt 3: Infrastruktur**

Zentrales Ziel ist die technische Weiterentwicklung der Beobachtungsinfrastruktur der FGS für die langfristige Sicherung der geodätischen Beiträge zur Bereitstellung eines homogenen, konsistenten Raumbezugs hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Gleichzeitig sind Anstrengungen organisatorischer Natur auf administrativer und politischer Ebene durch Mitarbeit in den internationalen Diensten und Gremien weiterzuführen. Daraus ergeben sich die folgenden Ziele mit zugeordneten Aufgaben:

Der *operationelle Messbetrieb* soll im Rahmen der internationalen Dienste der IAG fortgeführt und kontinuierlich hochwertige Beiträge der Messsysteme bereitgestellt werden. Die Twin-Teleskope und SOS-W sollen in den operationellen Betrieb überführt und die Laser-Messungen zum Mond wieder aufgenommen werden. Zudem soll am Geodätischen Observatorium Wettzell ein DORIS System aufgebaut und betrieben werden.

Die FGS beteiligt sich auch in der neuen Projektperiode aktiv an den *wissenschaftlichen Diensten der IAG*. Sie beteiligt sich an Projekten und an geodätischen Infrastrukturaufgaben von IAG und GGOS. Zur Gestaltung der Projekte und Programme strebt die FGS Schlüsselpositionen in den Diensten und Gremien an.

Im Rahmen der FGS wird das GGOS Büro für Produkte und Standards betrieben mit dem Ziel, die für die Realisierung eines konsistenten Raumbezugs erforderlichen *einheitlichen Standards* zu evaluieren und deren Einhaltung in den Diensten zu überprüfen.

Die durch den Einsatz der neuen Großgeräte geplante gesteigerte Datengewinnung macht eine *Automatisierung* der Abläufe erforderlich. Insbesondere soll der Betrieb der Radioteleskope wie auch der beiden Laserinstrumente gemeinsam geführt werden, was den Ausbau der Digitaltechnik sowie die Implementation von Zusatzelektronik zur Gewährleistung der Sicherheit erfordert.

Die einzigartige *geodätische VLBI-Infrastruktur* am Geodätischen Observatorium Wettzell soll optimal genutzt und auch für Spezialexperimente des IVS eingesetzt werden. Die lokale Korrelation der Daten des Drei-Teleskoparrays wird angestrebt und die Nachrüstung des 20m-Radioteleskops auf Breitbandempfang wird untersucht. Die VLBI-Station O'Higgins soll erhalten und die Fernsteuerbarkeit verbessert werden.

Am Geodätischen Observatorium Wettzell soll eine *einheitliche Zeitbasis* für alle Geräte eingerichtet und demonstriert werden. Die präzise Synchronisation der Instrumente soll auf weitere geodätische Observatorien mittels Laser-Zeittransfer über Satelliten ausgedehnt und die Möglichkeit des Anschlusses des Observatoriums an eine optische Referenzuhr bei der PTB soll untersucht werden.

Das *Sensornetzwerk* um Wettzell soll erweitert und um zusätzliche Sensorik ergänzt werden zur Unterstützung der Beobachtung von lokalen Deformationen und atmosphärischen Parametern.

Die Nachhaltigkeit und Stabilität des *GREF-Stationsnetzes* und die Qualität der Beobachtungsdaten soll gesichert werden durch die Laufendhaltung von Hardware und Software sowie Optimierung der Rechen- und Kommunikationsinfrastruktur und Wartungsfreundlichkeit.

Die *Schwerereferenz für Deutschland* soll sichergestellt werden durch die Fortführung der Beteiligung am internationalen Schwerereferenzsystem, die Realisierung einer gravimetrischen Referenzstation am Geodätischen Observatorium Wettzell und die Beobachtung der Entwicklung neuer Technologien und Messprinzipien.

Die nachhaltige *Datenhaltung* der Mess- und Modellzeitserien und die Bereitstellung der Daten über Portale sollen auf dem neuesten Stand der Technik weiterentwickelt werden. Für Messdaten und Produkte soll ein Konzept zur Nutzung von DOI ausgearbeitet werden.

Kapitel 1 führt ins Thema ein. Startpunkt ist das Global Geodetic Observing System (GGOS) und die Rolle der Geodäsie zur Beschreibung von Veränderungsprozessen im System Erde. Daraus wird die Rolle der geodätischen Observatorien abgeleitet. Das Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) und die von ihr betriebenen Observatorien. Kapitel 2 stellt eine kurze Bilanz der Arbeiten und Resultate im Kontext des Forschungsprogramms 2011-2015 zusammen. Kapitel 3 beschreibt das neue Forschungsprogramm, aufgeteilt in die drei oben genannten Schwerpunkte. Das Dokument schließt mit sechs Anhängen. Anhang A spezifiziert die Verantwortungsbereiche der Partner innerhalb der FGS. Anhang B listet die instrumentelle Ausstattung der Observatorien der FGS auf. Anhang C beschreibt tabellarisch die Beiträge der Partner aus der Grundausstattung und listet die abgeschlossenen, laufenden und geplanten Drittmittelprojekte zur haushaltsmäßigen Absicherung des Programms auf. Anhang D zeigt tabellarisch die Beiträge zu den internationalen wissenschaftlichen Diensten und Gremien auf. Anhänge E und F schließlich listen die verwendeten Referenzen und Abkürzungen auf.

1 Einführung

Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) ist die Nachfolgeorganisation des 1970 gegründeten DFG Sonderforschungsbereichs 78 „Satellitengeodäsie“, dessen zwei Teilprojekte einerseits die Gewinnung und Aufbereitung, andererseits die geodätische Nutzung von Satellitenbeobachtungen sowie terrestrische Ergänzungsmessungen im Fokus hatten. Von Anfang an wurde eine enge Verzahnung der Forschungsarbeiten im Bereich der raumgeodätischen Mess- und Beobachtungsverfahren mit denjenigen im Bereich der Methoden- und Modellentwicklung angestrebt (Schneider, 1990). Am 1. Juli 1983 wurde der Sonderforschungsbereich in die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie als Dauereinrichtung übergeführt. Gemäss Satzung umfassen die Aufgaben der FGS Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Satellitengeodäsie unter besonderer Berücksichtigung der Geodynamik und insbesondere den Betrieb und den weiteren Ausbau des Geodätischen Observatoriums (GO) Wettzell.

Die ursprüngliche Zielsetzung hat sich seit der Einrichtung des SFB 78 nicht grundsätzlich geändert, wurde aber der rasanten Entwicklung der raumgeodätischen Messmethoden und der Nutzung der Beobachtungen in den Erdwissenschaften stets angepasst. Die Arbeiten der FGS decken die gesamte Kette ab von der Erfassung präziser und ununterbrochener Beobachtungszeitreihen über die Analyse dieser Beobachtungen und der Entwicklung der entsprechenden Methoden, die Ableitung hochwertiger geodätischer Produkte und deren Nutzung und Anwendung in den Geowissenschaften. Fokus der FGS ist das Geodätische Observatorium Wettzell, welches unter den Fundamentalstationen eine herausragende Rolle einnimmt. Zusammen mit den weiteren im Rahmen der FGS betriebenen geodätischen Observatorien ist es als Kernelement des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems (GGOS) unverzichtbarer Teil der globalen geodätischen Infrastruktur zur Erforschung der Veränderungsprozesse im System Erde.

1.1 Globale Veränderungsprozesse und GGOS

Veränderungsprozesse im System Erde stellen eine große gesellschaftliche Herausforderung dar. Aufgrund antropogener Einflüsse ändert sich das Klima schneller als jemals zuvor. Gletscher schmelzen ab, der Meeresspiegel steigt an, Klimazonen und Wasserressourcen verschieben sich, Permafrostböden tauen auf. Die Politik ist gefordert, Strategien zum Umgang mit dem globalen Wandel und zum Schutz vor Naturgefahren zu entwickeln. Unabdingbar hierzu ist ein detailliertes Verständnis der Prozesse im System Erde und der komplexen Wechselwirkungen zwischen dessen Teilsystemen. Grundlage für dieses Verständnis ist wiederum die präzise Messung und Modellierung von Massen- und Energieflüssen in und zwischen den Systemen.

Rolle der Geodäsie

Hier spielt die Geodäsie heute eine bedeutende Rolle. Sie stellt mit den geodätischen Raumverfahren, den neuen Schwerefeld-Satellitenmissionen, einer Konstellation von Altimetersatelliten, aber auch mit terrestrischen Gravimetern das Instrumentarium für die Metrologie der Prozesse des globalen Wandels bereit. Satellitenmissionen erlauben es, Massentransporte im System Erde global und kontinuierlich aus dem Weltall zu messen. Die geodätischen Raumverfahren spielen eine Schlüsselrolle bei der Bereitstellung der metrologischen Basis – des hochpräzisen und langzeitstabilen globalen Referenzrahmens – zur Messung von Veränderungen auf allen Zeit- und Raumskalen, von Deformationen der Erdkruste während Erdbeben bis zum langsamen aber stetigen Anstieg des Meeresspiegels. Dabei beschränkt sich die Aufgabe der Geodäsie nicht auf

die Messdatenerfassung, die Datenanalyse und Methodenentwicklung sondern umfasst auch in Zusammenarbeit mit Geophysik, Glaziologie, Ozeanographie, Hydrologie, Meteorologie und anderen Geowissenschaften, die Modellierung und Interpretation.

Ausgehend von der Erkenntnis, dass eine weitergehende Integration der geodätischen Techniken und Methoden zwingend erforderlich ist, um einen integrierten Raumbezug als stabile Referenz für alle Massentransport- und Deformationsprozesse im System Erde zu realisieren, hat die Internationale Assoziation der Geodäsie (IAG) 2007 beschlossen, ein Global Geodetic Observing System (GGOS) aufzubauen (Plag und Pearlman, 2009; Drewes 2007). Dabei sind entscheidende Impulse von der FGS ausgegangen (Rummel et al., 2000). Der Grundgedanke ist, dass die konsistente Verknüpfung der drei geodätischen Pfeiler, der Bestimmung von Form, Rotation und Schwerefeld der Erde sowie deren zeitlichen Variationen erforderlich ist, um geometrische und gravimetrische Äußerungen von Massentransporten in der Atmosphäre, den Ozeanen und Eiskappen konsistent zu erfassen und den Massenaustausch zwischen den Erdsystemkomponenten global zu bilanzieren.

GGOS wiederum ist Teil des Global Earth Observing System of Systems (GEOSS), welches von der zwischenstaatlichen Group on Earth Observations (GEO) initiiert wurde, um die Grundlagen zu schaffen für Fortschritte in verschiedenen Bereichen mit sozioökonomischem Nutzen („Societal Benefit Areas“). Unabdingbar ist dabei die Sicherstellung des Austausches von validierten Daten und Resultaten („Interoperabilität“) mit den an GEOSS beteiligten Beobachtungssystemen wie dem Global Climate Observing System (GCOS) und dem Global Ocean Observing System (GOOS). Zusammen mit GEOSS sind auch die europäischen Infrastruktur-Initiativen Copernicus (früher GMES, Global Monitoring of Environment and Security) sowie INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) zu nennen. Am 26. Februar 2015 hat die UN Generalversammlung in einer Resolution die Wichtigkeit raumbezogener Information, des International Terrestrial Reference Frame (ITRF) als metrologische Basis sowie die erforderliche Verbesserung der Nachhaltigkeit und Leistungsfähigkeit von GGOS unterstrichen und die Erweiterung der nationalen geodätischen Infrastruktur der Mitgliedsländer als Grundlage zur weiteren Verbesserung des globalen geodätischen Referenzrahmens gefordert.

Rolle der geodätischen Fundamentalstationen

Die Ziele von GGOS sind ambitioniert. Gefordert wird eine Genauigkeit und Langzeitstabilität des globalen geozentrischen Referenzrahmens von 1 mm und 0.1 mm/Jahr und besser, eine kontinuierliche Messung der geometrischen und gravimetrischen Veränderungen sowie eine Verfügbarkeit der Resultate für die Erdsystemforschung und Überwachung von Naturgefahren in nahezu Echtzeit. Dies sind Anforderungen, welche nur durch eine konsistente Kombination der geodätischen Messverfahren erreichbar sind (Plag und Pearlman, 2009). Eine zentrale Komponente dafür sind geodätische Fundamentalstationen, welche die geodätischen Raumverfahren an einem Observatorium vereinen und damit eine Kombination erst ermöglichen. Gegenwärtig sind weltweit sieben Fundamentalstationen in Betrieb, welche die wichtigsten Techniken SLR, VLBI und GNSS vereinen. Weitere sind im Aufbau. Studien haben ergeben, dass zum Erreichen der GGOS Ziele 30 global verteilte Stationen erforderlich sind.

Das Geodätische Observatorium Wettzell, welches im Rahmen der FGS betrieben wird, ist eine der global sieben Fundamentalstationen. Das Observatorium TIGO, welches im Rahmen der FGS in Concepción, Chile, aufgebaut wurde und nach dem Transport gegenwärtig in La Plata in Argentinien aufgebaut wird, ist ebenfalls eine dieser sieben Kernstationen.

Abbildung 1-1 zeigt ein Panoramabild der Fundamentalstation Wettzell zusammen mit einer Skizze einer idealen GGOS Station, wie sie das Titelblatt des Dokuments „Site Requirements for GGOS Core Sites“ (GGOS 2012) ziert. Die Ähnlichkeit ist bemerkenswert, lediglich ein DORIS Sender ist am Observatorium nicht vorhanden, Untersuchungen zur Abklärung eines geeigneten Standorts auf dem Gelände sind allerdings im Gange. Die Fundamentalstation Wettzell kann als Prototyp einer GGOS Station bezeichnet werden. 2012 wurde der Station der Status einer GGOS Legacy Station offiziell verliehen. Neben der Tatsache, dass das Geodätische Observatorium Wettzell zentral zum Globalen Geodätischen Beobachtungssystem beiträgt, muss auch dessen Rolle als Kernelement der nationalen geodätischen Infrastruktur Deutschlands betont werden, welches den hochpräzisen und nahtlosen Anschluss des nationalen Referenzsystems als Grundlage für alle nationale Georeferenzierung an die Nachbarländer sichert.

Das Erreichen der GGOS-Ziele als hochwertigen Beitrag zur Erdsystemforschung erfordert nicht nur den Betrieb von Fundamentalstationen, sondern auch die Weiterentwicklung der Messtechniken, der hochstabilen Realisierung der lokalen Verknüpfung der Messsysteme, der integrierten Nutzung von Zeit und Frequenz und der Evaluation neuartiger Sensoren. Genauso wichtig für ein Monitoring von Erdsystemparametern sind aber auch eine moderne Datenhaltung und die nahtlose Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Diensten als Koordinatoren der Messaufgaben. Zentral ist schließlich die Weiterentwicklung der Methodik und Entwicklung neuer Konzepte zur Datenanalyse, zur konsistenten Kombination und Integration der Messdaten, der detaillierten Modellierung von Fehlerquellen unter Nutzung von Zusatzinformationen alternativer Sensoren und geophysikalischer Modelle sowie schließlich der Interpretation der Resultate im interdisziplinären Verbund mit den Geowissenschaften.

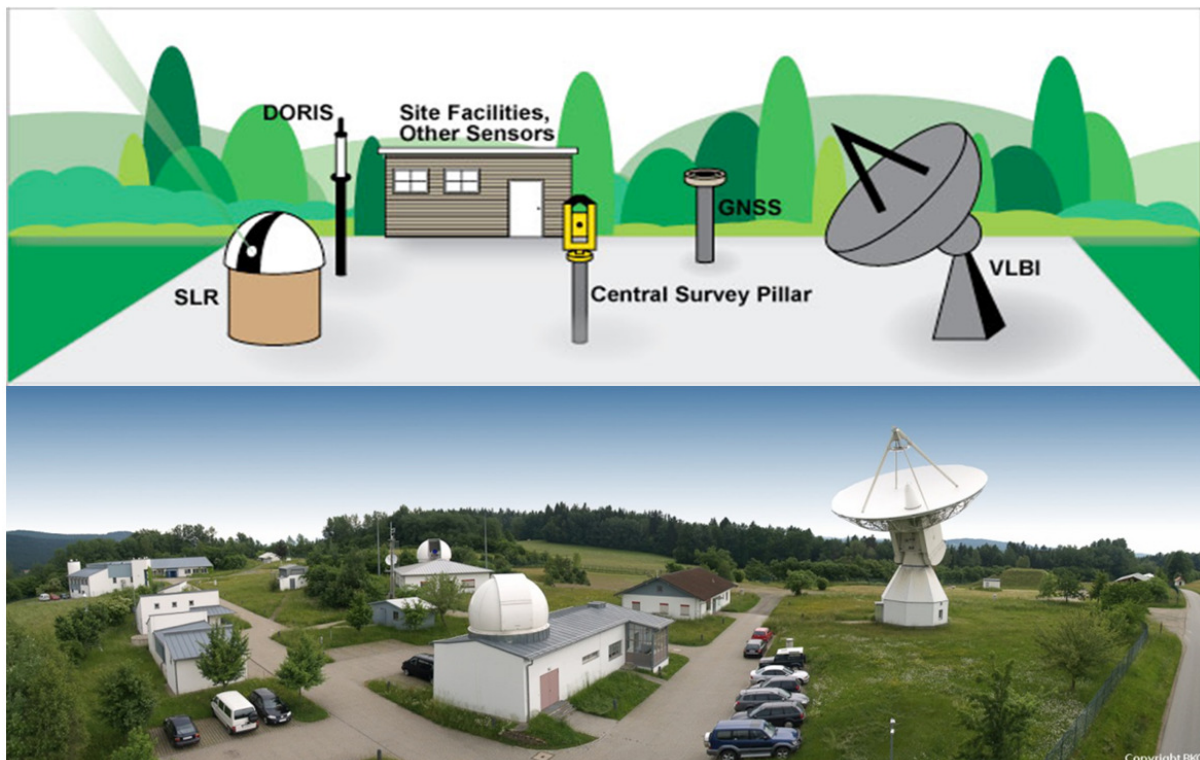


Abbildung 1-1: Oben: Aus Titelbild des GGOS Dokuments „Site Requirements for GGOS Core Sites“ (GGOS, 2012). Unten: Überblick über das Geodätische Observatorium Wettzell (noch ohne die Twin-Radioteleskope)

Zukunftsthemen

Integrierte geodätische Fundamentalstationen, aber auch geodätische, mit den verschiedenen Messverfahren ausgerüstete Satelliten wie beispielsweise GRASP (Geodetic Reference Antenna in Space) werden zum Erreichen der GGOS-Ziele eine zentrale Rolle spielen. Die erforderliche konsistente Integration der verschiedenen geometrischen und gravimetrischen, flächenhaften und punktwisen Messverfahren zur Realisierung eines globalen, präzisen und langzeitstabilen integrierten Raumbezugs erfordert die Weiterentwicklung adäquater Beobachtungs-, Analyse- und Kombinationsverfahren sowie die Verbesserung der entsprechenden Beobachtungsmodelle und der geophysikalischen Hintergrundmodelle. Geodätische Observatorien werden zu integrierten atmosphärischen Sensoren zum besseren Verständnis der atmosphärischen Fehlereinflüsse auf geodätische Messgrößen. Neue Sensoren wie Atominterferometer werden geodätische Aufgaben übernehmen und werden in die Analyse und Modellierung integriert werden.

Alle raumgeodätischen Messverfahren beruhen auf der Messung von Signallaufzeiten. Sie beruht auf stabilen Oszillatoren zur Zeitmessung, Zeitdifferenzmessung, Frequenzmessung. Für eine konsistente Integration der Verfahren im Rahmen von GGOS wird auch die gemeinsame Nutzung von Zeit und Frequenz durch alle Verfahren sowohl in der physischen Verknüpfung der Messtechniken als auch in der Datenanalyse wichtig. Geodätische Verfahren spielen bereits heute eine zentrale Rolle bei der Synchronisation und Syntonisation von Uhren und Oszillatoren. Mit der Entwicklung hochstabiler Frequenzstandards wird die Realisierung der internationalen Atomzeit aus einem globalen Netz von Uhren zu einer geodätischen Aufgabe. Die Uhren müssen mit hoher Präzision synchronisiert und deren Positionen im variablen Potential der Erde muss präzise modelliert werden. Geodätische Observatorien werden zu Referenzpunkten zur punktwisen Messung von physikalischen Höhen mit Uhren im Rahmen einer relativistischen Geodäsie. Damit werden sich die geodätische Observatorien und Zeitlabors zu Observatorien der Raumzeit entwickeln und den integrierten Raum-Zeit-Bezug im relativistischen Sinne konsistent realisieren.

1.2 Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie

Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie wurde am 1. Juli 1983 als Nachfolge des Sonderforschungsbereichs SFB 78 gegründet. Die beteiligten Institutionen sind

- das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frankfurt am Main,
- die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München,
- der Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie (APG) der Technischen Universität München,
- das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM),
- sowie das Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Universität Bonn.

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München stellen mit wissenschaftlichem und technischem Personal den Beobachtungsbetrieb des Geodätischen Observatoriums sowie dessen technologische Weiterentwicklung im Rahmen des FGS Forschungsprogramms sicher. In die Stationsleitung ist zudem der Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TUM eingebunden.

Im Zeitraum 2011-2015 haben sich in Namen und Organisationsform zweier der beteiligten Institutionen Änderungen ergeben. In Folge einer Strukturrevaluation der durch den Freistaat Bayern finanzierten nichtuniversitären Forschungseinrichtungen im Jahre 2012 wurde das DGFI am 1. Januar 2015 in den Lehrstuhl für Geodätische Geodynamik (Prof. Seitz) der Ingenieur fakultät Bau, Geo, Umwelt (BGU) an der Technischen Universität (TUM) integriert. Es trägt seither den Namen Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM). Aus organisatorischen Gründen wurden die Institute der Ingenieur fakultät BGU der TUM zum 31. Dezember 2014 aufgelöst. Damit existiert das Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG) formal nicht mehr. Rechtsnachfolger ist der Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie (APG, Prof. Pail). Die Aufgabenbereiche des Fachgebiets Satellitengeodäsie (FSG, Prof. Hugentobler), welches ebenfalls Teil des IAPG war, wurden für das FGS Forschungsprogramm der Einfachheit halber dem Aufgabenbereich der FESG zugeordnet.

Gemäß Satzung umfassen die Aufgaben der FGS Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Satellitengeodäsie unter besonderer Berücksichtigung der Geodynamik und insbesondere zur langfristigen Sicherstellung des Betriebs des Geodätischen Observatoriums Wettzell und des weiteren Ausbaus der Station auf hohem wissenschaftlich-technischem Niveau. Obschon sich die ursprüngliche Zielsetzung seit der Einrichtung des SFB 78 nicht grundsätzlich geändert hat, wurden die Aufgaben der rasanten Entwicklung der geodätischen Messmethoden und deren Nutzung stetig angepasst und es konnten signifikante Beiträge geleistet werden. Dank der breiten thematischen und methodischen Aufstellung der Partner ist es der FGS möglich, die gesamte Kette von der Erfassung der geodätischen Messdaten und zugehöriger Weiterentwicklung der Messtechnik über die Verarbeitung, Analyse und Kombination der Beobachtungen und Weiterentwicklung der entsprechenden Modelle und Methoden bis zur Interpretation der Resultate im Kontext der Sicherstellung und Weiterentwicklung des integrierten Raumbezugs und der geodätischen Erdsystemforschung abzudecken. Die schwerpunktmäßige Zuordnung der Verantwortlichkeiten der Partner im Rahmen des FGS Forschungsprogramms ist in Anhang A dargestellt.

Das Forschungsprogramm der FGS wird von den beteiligten Institutionen gemeinsam erstellt und in 5-jährigem Rhythmus von einem Gutachtergremium aus deutschen und internationalen Experten evaluiert.

1.3 Das Geodätische Observatorium Wettzell

Das Geodätische Observatorium ist seit nunmehr 40 Jahren ein stabiler Fundamentalknotenpunkt der Geodäsie und zukünftig als GGOS Core Site ein wichtiger Beitrag Deutschlands zum Global Geodetic Observing System. Das Observatorium ist mit einer Reihe von Messsystemen ausgestattet und unterstützt mit dem IVS, ILRS, IGS und BIPM mehrere IAG Dienste. Abbildung 1-2 zeigt eine aktuelle Panorama-Aufnahme des Observatoriums.

Neben den grundsätzlich global verteilten Systemen der geodätischen Raumverfahren (VLBI, SLR und GNSS), die allesamt in Wettzell innerhalb von 150 Metern Entfernung kolloziert sind, wird hier ein einzigartiger Großringlaserkreislauf betrieben, der hochaufgelöste Messungen der Erdrotation liefert. Zusätzlich zu dem lokalen Vermessungsnetz, über das die Verbindungsvektoren zwischen den Referenzpunkten der Einzelsysteme bestimmt werden, liefert ein regionales Footprint-Netzwerk den notwendigen Stabilitätsnachweis und sichert den Anschluss an die amtlichen Vermessungsnetze. Zwei TerraSAR-X Reflektoren sowie zahlreiche ergänzende Sensoren (z.B. Hydrologie, Inklinometer, Seismometer) kom-

plettieren die Ausstattung. Zusätzlich werden im Schwerelabor gegenwärtig zwei supraleitende Gravimeter auf dem Observatorium betrieben.

Das seit 1984 kontinuierlich betriebenen 20 m Radio Teleskop Wettzell (RTW) wird nunmehr durch die beiden neuen und VGOS-kompatiblen 13.2 m Twin Teleskope ergänzt. Das Teleskop-Paar stellt eine wesentliche Infrastruktur-Maßnahme der letzten Jahre dar, verknüpft mit dem Ziel, zukünftig als stabile und zuverlässige Systeme im VGOS-Netzwerk zur Verbesserung der Festlegung globaler Referenzrahmen beitragen zu können. Auch stehen mit WLRS und SOS-W nunmehr zwei SLR-Messsysteme zur Verfügung. Auf dem Geodätischen Observatorium Wettzell sind somit nicht nur alle wesentlichen Systeme der Raumverfahren (gegenwärtig noch ohne DORIS) vorhanden, sondern sie werden auch redundant betrieben. Dies liegt nicht nur in dem operativen Ziel begründet, möglichst zuverlässig und ausfallssicher zu den internationalen geodätischen Diensten beitragen zu können, sondern schöpft auch Synergien zwischen den Einzelsystemen aus.

Das Zeit-/Frequenzlabor liefert mit seinen 5 Cäsium-Uhren und 3 operativen Wasserstoffmasern seit vielen Jahren neben der PTB Braunschweig einen nationalen Beitrag zur internationalen Definition der Atomzeitskala. Umfangreiche Modernisierungsmaßnahmen sind hier bzgl. der hochpräzisen Frequenz- und Zeitpuls-Verteilung geplant. Eine ausführlichere Beschreibung des Observatoriums Wettzell sowie TIGO und O'Higgins findet sich in Anhang B.

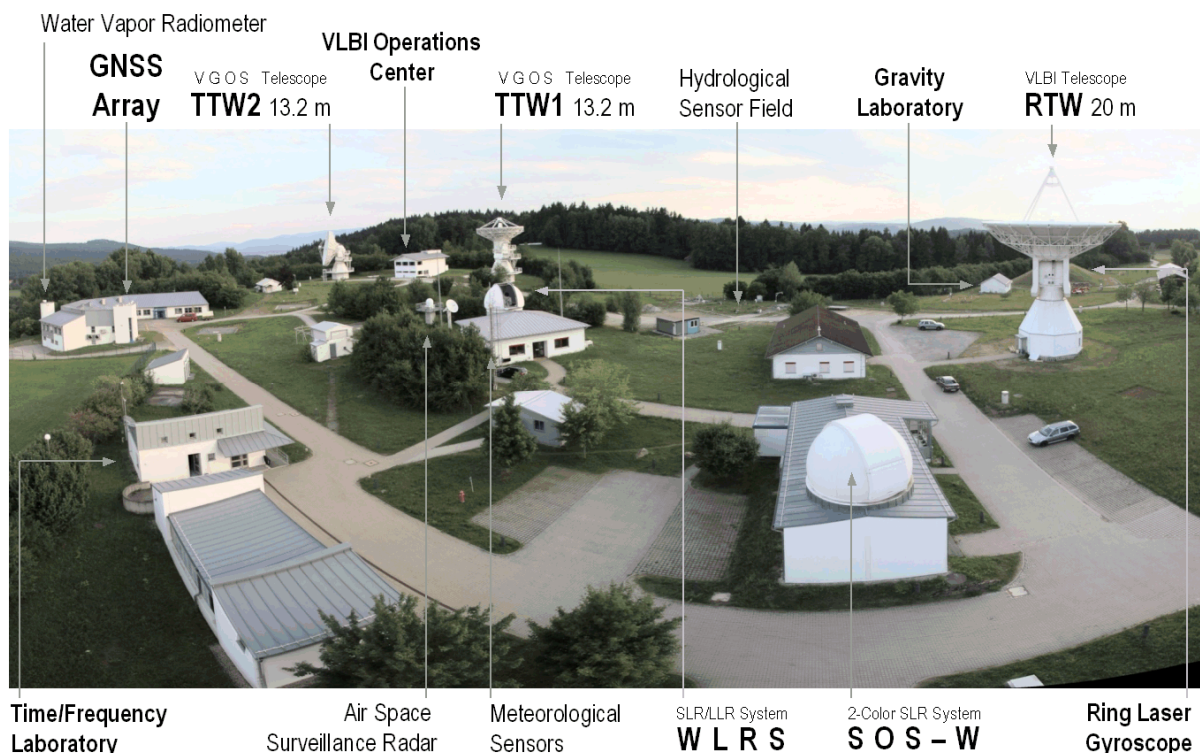


Abbildung 1-2: Panoramaaufnahme des Geodätischen Observatoriums Wettzell

2 Bilanz im Kontext des laufenden Forschungsprogramms

Mit dem Forschungsprogramm 2011 – 2015, konzipiert im Jahr 2010, wurde der Rahmen für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der FGS der letzten Jahre abgesteckt. In dieser Zeit hat die Geodäsie im Allgemeinen und die FGS im Besonderen eine Vielzahl von konkreten Neuerungen erfahren und beachtliche Ergebnisse produziert. Naturgemäß sind diese mit den Fortschritten in der technologischen Entwicklung, aber auch mit der geodätischen Forschung auf den verschiedenen Gebieten verbunden.

Begründet durch den Kern der FGS am Geodätischen Observatorium Wettzell hat die Weiterentwicklung der geodätischen Beobachtungsinstrumente und -verfahren im letzten Forschungsprogramm einen sehr großen Raum eingenommen. Damit verbunden sind auch die technischen Veränderungen der vom BKG betriebenen Stationen GARS O'Higgins in der Antarktis und des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums (TIGO) in Concepcion, Chile. Ein weiterer Baustein des letzten Forschungsprogramms war die Informationstechnologie mit der Datenaufbereitung und -archivierung, bei der neue Möglichkeiten durch verbesserte Speichertechniken genutzt werden sollten. Auf der Auswerteseite standen die methodischen Grundlagen im Fokus, wobei die starke Wechselwirkung mit der Erdsystemforschung herausgearbeitet wurde. Schließlich ist noch die Beteiligung der FGS an den Internationalen Diensten zu nennen, die für die FGS überaus positive Auswirkungen auf den Austausch von weltweit erzeugten Beobachtungsdaten hat.

Im Folgenden sollen die genannten Komplexe angerissen werden, um eine Bilanz des letzten Forschungsprogramms zu ziehen. Dabei wird aus Übersichtlichkeitsgründen nicht weiter auf solche Arbeiten eingegangen, die eine Weiterführung langjähriger Aufgaben darstellen. Die Überschriften der einzelnen Abschnitte sind an das Forschungsprogramm 2011 – 2015 angelehnt. Detailinformationen zu den erreichten Zielen, belegt durch entsprechende Referenzen, sind dem Dokument „Bilanz des FGS Forschungsprogramms 2011 – 2015“ zu entnehmen. Am FGS Workshop in Bad Kötzting am 24.-25. April 2013 haben die Mitglieder der FGS über die in der ersten Hälfte des Berichtszeitraums erzielten Resultate berichtet. Der Workshop gliederte sich in die drei Bereiche „Beobachtungstechnologien“, „Datenanalyse und Referenzsysteme“ und „Schwerefeldmodellierung und Erdsystemforschung“. Das Programm des Workshop findet sich unter <http://www.fs.wettzell.de/veranstaltungen/fgs/workshop2013/fgs2013.html>

2.1 Messsysteme der FGS

Zeit und Frequenz

Zentrales Element jedes geodätischen Observatoriums ist die Zeithaltung und die Verteilung von Frequenzen an die verschiedenen Sensoren. Ziel der Arbeiten des letzten Programmzeitraums war es, alle Sensoren von einer einzigen Referenzuhr aus phasenstabil zu versorgen, um eine repräsentative Zeitskala für alle Messsysteme zu erzeugen, insbesondere in Hinblick auf die Kombination der Messreihen der einzelnen Messverfahren. Voruntersuchungen auf dem GO Wettzell im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Space-Time Reference Systems for Monitoring Global Change and for Precise Navigation in Space“ (FOR 1503) haben gezeigt, dass Variationen in der Zeitverteilung im Bereich von mehreren Nanosekunden innerhalb weniger Stunden in dem Koaxialkabelsystem auftreten können. Im Berichtszeitraum wurde ein neues Konzept für die Frequenz- und Zeitverteilung unter Verwendung aktueller Frequenzkammtechnologie aufgestellt. Hierbei werden alle Stationsuhren auf optischem Wege

durch eine Einstein-Synchronisation auf dem gleichen Stand gehalten. Aktive Regler halten den Zwei-Wege-Durchlauf der Femtosekundenpulse eines auf den zentralen Maser (Interpolator) synchronisierten Frequenzkamms in einer Faserstrecke über einen großen Frequenzbereich hinweg bis auf ca. 1 Pikosekunde konstant. Gleichzeitig triggern alle an diese Sternverteilung angeschlossenen Messsysteme ihre Zeitzählung auf den gleichen PPS-Puls (PPS = Puls pro Sekunde), deren zeitlicher Versatz präzise aus dem Einstein-Synchronisationsprozess für jedes Messsystem und zu jeder Zeit mit einem Auflösungsvermögen von 1 Pikosekunde ermittelt wird. Die technische Spezifikation des Konzepts ist abgeschlossen. Mit der Integration der Faserverteilung und der Inbetriebnahme der ersten kompensierten Strecken wird in der zweiten Jahreshälfte 2015 gerechnet.

Radiointerferometrie

Allein schon aufgrund der Größe der Radioteleskope hat die VLBI-Infrastruktur den größten Anteil am GO Wettzell. Für das 20m-Teleskop erlaubt eine neue, parallele Empfängereinheit, dass zusätzlich zum herkömmlichen S-/X-Band auch die L1-Frequenzen der GNSS-Satelliten empfangen werden können. Damit wird ein Testfeld geschaffen, das es erlaubt, aktuelle und zukünftige In-Orbit-Ko-Lokationen der Messsysteme des Observatoriums über Satellitenorbits zu realisieren. Eine auf den neuesten Stand gebrachte Kryokammer (Dewar) mit ihren Low-Noise-Verstärkern sichert zudem einen kontinuierlichen, ausfallfreien Betrieb und ermöglicht die Verlängerung der Wartungsintervalle. Die Erneuerung der Elevationslager im Jahr 2010 und die folgende Überarbeitung des Servo- und Antriebssystems im Jahre 2013 erlauben nun den Betrieb mit neuester Technik. Parallel zu den in die Jahre gekommenen klassischen Mark4-Backends wurden parallel auch die digitalen Systeme DBBC und ADS3000+ in Verbindung mit den aktuellen Datenrekorden Mark5B+ getestet und stehen zur Beobachtung bereit.

Im Jahr 2014 konnte außerdem das erste der beiden Twin-Teleskope in einen regelmäßigen Testbetrieb gehen. Allerdings ist es aktuell noch mit einem S-/X-/Ka-Band-Feedhorn für beide Polarisationsrichtungen ausgestattet und bedient sich mehr oder weniger breiter Empfangstechniken nach klassischem Muster. Es zeigt sich aus den bisher in über 180 Stunden durchgeführten, regelmäßigen, klassischen UT1-Intensive-Messungen, dass die Antenne eine sehr gute Positionsgenauigkeit im X-Band liefert, während das S-Band erheblich unter Störsignalen leidet. Die Performanz der Empfangssysteme erfüllt in allem die Erwartungen.

Für die zweite Antenne des Twin (und später dann auch für die erste) ist ein Breitbandfeedhorn nach dem VGOS-Design in Entwicklung. Hierbei hat man auf das Elevenfeed gesetzt, das von der Firma Omnysis in Schweden gefertigt wird und von 2 bis 14 GHz breitbandig empfängt. Erste Ergebnisse aus Labortests aber auch aus der Erprobung in Wettzell (Clear-Sky-Tests) bestätigen die vielversprechenden Spezifikationen.

Korrelation

Bevor VLBI-Beobachtungsdaten tatsächlich für eine geodätische Auswertung genutzt werden können, müssen sie einen Korrelationsprozess an einem der wenigen weltweit verfügbaren Korrelationszentren durchlaufen. Unter der Ägide der FGS wird eines davon in Bonn mit substanziellen Mitteln des BKG und des IGG betrieben. Nach der Umstellung von einem reinen Hardware- zu einem reinen Software-Korrelator Ende 2010 konnte der Durchsatz der Daten erheblich gesteigert werden. So ist die Zahl der Stationen, die in einem Pass korreliert werden können, von ehemals sechs soweit angewachsen, dass sie nur noch durch die Zahl der vorhandenen Wiedergabekanäle (derzeit 24) limitiert ist. Da heutige Magnetplattensysteme vergleichsweise zuverlässig arbeiten, können die

Korrelationen oft in der Nacht oder an Wochenenden ohne menschliche Interventionen ablaufen. Ein ungelöstes Problem ist weiterhin der Transfer der Rohdaten von den Observatorien zum Korrelator. Da die Datenströme interkontinental geroutet werden müssen, können keine dedizierten Leitungen benutzt werden, und die letzte „Meile“ muss vom DFN-Verein geleast werden. Damit ist die Kapazität der Leitung auf 1 GBit/s limitiert, da eine Steigerung mit einem nicht zu vertretenden Finanzierungsbedarf einher gehen würde. Aus diesem Grund müssen einige Stationen weiterhin Magnetplattensysteme mit Kurierdiensten verschicken, und eine Steigerung der Aufnahmebandbreite von derzeit 256 MBit/s in den VLBI-Netzen ist noch nicht möglich.

Satelliten-Laserentfernungsmessung

Das Wettzell Laser Ranging System (WLRS) wurde im Berichtszeitraum auf die vorgesehenen Aufgabenschwerpunkte, optische Zeitübertragung, HEO- und LLR-Beobachtung (High Earth Orbiter und Lunar Laser Ranging) vorbereitet. Nach vollständiger Überarbeitung des Teleskops wurde auch der Puls laser gegen ein System ausgetauscht, welches eine Pulsbreite von 10 ps zur Verfügung stellt und damit schärfer messen kann. Die höhere Messgenauigkeit ist für die SLR-Anwendung von Vorteil und für die Zeitübertragung im Rahmen des ELT-Projekts wichtig. In das Beobachtungsprogramm des WLRS sind jetzt alle HEO Ziele (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, IRNSS, Etalon und RadioAstron) integriert und werden regelmäßig beobachtet. Der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) wurde über den gesamten Missionsverlauf unterstützt.

Das Teleskop des neu installierten Satellite Observing Systems (SOS-W) musste im Berichtszeitraum einer umfangreichen Überarbeitung hinsichtlich der Gestaltung des Tubus, der optischen Qualität des Sendeteleskops sowie der Antriebseinheit unterzogen werden. Trotz der nicht gänzlich abgeschlossenen Überarbeitung konnte das System im Mai 2014 den Probetrieb aufnehmen und bereits einen Beitrag zur Satelliten-Spinanalyse liefern. Ein VGOS-kompatibles Flugsicherungsgerät wurde in Form eines LIDARs im System integriert, so dass nunmehr im Frühjahr 2015 der Routinebetrieb aufgenommen werden kann.

Das TIGO SLR System konnte während des Berichtszeitraumes erfolgreich zum gesamten ILRS Beobachtungsprogramm beitragen. Gegen Ende des Einsatzes in Concepción wurde ein wartungsfreundlicher Pumplaser installiert, um die Ausfallsicherheit des Systems zu erhöhen.

Pilotprojekte

In Wettzell konnte in einem Pilotprojekt eine photokonduktive Antenne zum Nachweis von laserinduzierten Mikrowellenpulsen genutzt werden, um Zeitübertragungsexperimente zwischen SLR- und VLBI-Stationen durchzuführen und einen Beitrag zur Realisierung eines 4-dimensionalen Referenzpunktes zu leisten. Als weiteres Pilotprojekt für alternative Transponderanwendungen konnte ein erster Konzeptentwurf für die Nutzung eines per PRN-Codes modulierten CW-Lasers am WLRS erstellt werden. Erste lokale Experimente am Boden werden in der zweiten Jahreshälfte 2015 erwartet.

Globale Navigationssatellitensysteme

Zur Erweiterung des bestehenden Netzwerkes sowie zur besseren Anbindung an die Netze der Landesvermessung erfolgte eine Erweiterung des Footprint-Netzes um 6 SAPOS-Stationen in einem Abstand von 15 (Neukirchen b. Hl. Blut) bis zu ca. 80 km (Passau) sowie die frei verfügbare IGS/EUREF-Station in Vacov (60 km östlich von Wettzell). Für die von Wettzell aus betriebenen Referenzstationen erfolgte im Berichtszeitraum der Umstieg auf die neue RINEX Version 3.02. Gleichsam wurde die Antarktis-Station O'Higgins mit den Referenzpunkten OHI2 und OHI3

auf vollen GNSS-Betrieb (GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou) erweitert. Für die Stationen Wettzell und Reykjavík erfolgte ein Upgrade um BeiDou-Tracking-Fähigkeiten. Das über fast ein Jahr bestehende Kommunikationsproblem auf der Referenzstation Sofia konnte durch Inbetriebnahme einer neuen Satellitenkommunikations-Anlage gelöst werden. Bestehende Datenlücken im Archiv wurden erfolgreich geschlossen.

Die IGS-Station CONZ wurde in Verbindung mit dem Umzug von TIGO abgebaut. In Chile konnte kein Partner zum weiteren Betrieb der GNSS-Station gefunden werden. Damit geht eine 14-jährige Messreihe zuende, mit der auch die Auswirkungen des Erdbebens in der Region Concepción vom 27. Februar 2010 registriert wurden.

Gravimetrie

Die kontinuierlichen hochgenauen mit supraleitenden Gravimetern gemessenen terrestrischen Schwerezeitreihen auf den Stationen Wettzell, Bad Homburg, TIGO/Concepción und Medicina wurden unterbrechungsfrei fortgeführt. Die Kombination mit wiederholten Beobachtungen der FG5-Absolutgravimeter ergibt eine hohe Langzeitstabilität und trägt zur Überwachung des Schwerestands bei. Im August 2012 wurde nach Umbau ein zweites supraleitendes Gravimeter (SG029) am alten Standort für eine befristete Parallelregistrierung wieder in Betrieb genommen und damit die Möglichkeit für den Vergleich der Wirkung lokaler Massenvariationen geschaffen. Als Grundlage dafür wurde in Zusammenarbeit mit dem Referat GI7 „Entwicklung und Fernerkundung“ des BKG ein detailliertes Geländemodell erstellt.

Im Januar 2013 fand der zweite regionale Vergleich von sechs Absolutgravimetern von vier Institutionen aus Deutschland, Schweden und Tschechien statt. Damit wurde die Bedeutung der Station Wettzell als regionale Vergleichsstation und Teil eines zukünftigen internationalen Schwerereferenznetzes weiter ausgebaut. Im Oktober und November 2013 wurde erstmals eine mehr als zehntägige, ununterbrochene Schwerezeitreihe mit dem Quantengravimeter GAIN der AG „Optical Metrology“ (QOM) an der Humboldt-Universität Berlin gemessen. Im Vergleich mit dem parallel registrierenden Supraleitenden Gravimeter SG030 konnten



Abbildung 2-1: Container mit dem Transportablen Integrierten Geodätischen Observatorium (TIGO) auf dem Weg von Concepción, Chile, zum neuen Einsatzort in La Plata, Argentinien im Frühjahr 2015

die hohe Stabilität nachgewiesen und die instrumentelle Charakteristik dieser neuen Technologie der Absolutschweremessung detailliert untersucht werden. Aus den verfügbaren Messungen mit FG5-Absolutgravimetern wurde ein Referenzschwerewert im System der Internationalen Vergleiche zur Verfügung gestellt.

Die Modelle zur Berechnung der gravitativen Wirkung atmosphärischer Massenvariationen wurden weiterentwickelt und erlauben nun eine Berechnung im Globalmodell GME des DWD für beliebige Stationen weltweit. Die Effizienz dieser Korrekturen konnte für verschiedene Schwerezeitreihen supraleitender Gravimeter im GGP (Global Geodynamics Project) nachgewiesen werden.

Ringlaser

Durch Einsatz neuer Superspiegel im G Ringlaser in 2009 ist dessen Auflösungsvermögen um einen Faktor 2 gesteigert worden. Dies ermöglichte die Detektion von Toroidalmoden der Erde nach einem starken Erdbeben. Mit Hilfe eines Frequenzkamms und einer rückgekoppelten Regelschleife wurde es möglich, die optische Frequenz im Ringlaserresonator über mehrere Tage hinweg auf $\Delta f \leq 1$ kHz zu stabilisieren und damit die Langzeitstabilität zu verbessern. Abbildung 2-2 zeigt den Verlauf der Allan-Standardabweichung im Vergleich zum unstabilisierten Fall. Damit konnte die Chandler-Bewegung und der Einfluss der jährlichen Polbewegung messtechnisch erfasst werden.

Über längere Zeiträume hinweg konnte die Stabilisierung in dieser Form nicht aufrecht erhalten werden, da die Phasenlage des Rückstreusignals mit zwei Piezoelementen in einem quadratischen Ring nicht zu kontrollieren ist. Durch die Entwicklung eines analytischen Rückstreumodells kann das Rotationssignal a posteriori auch im Langzeitbereich auf weniger als $\Delta\Omega/\Omega < 10^{-8}$ stabil gehalten werden. Die Messungen werden jetzt hauptsächlich durch das Langzeitdriftverhalten der Neigungsmesser begrenzt. In Zusammenarbeit mit der VLBI-Gruppe an der TU Wien ist die Integration von Ringlasermessungen in die VLBI Zeitreihen weitergeführt worden.

Neuartige Spiegel auf der Basis kristalliner Strukturen haben sich in der Zeit- und Frequenzmetrologie als aussichtsreiche Zukunftstechnologie etabliert. Kristalline Spiegel im Wellenlängenbereich von $1.15 \mu\text{m}$ wurden

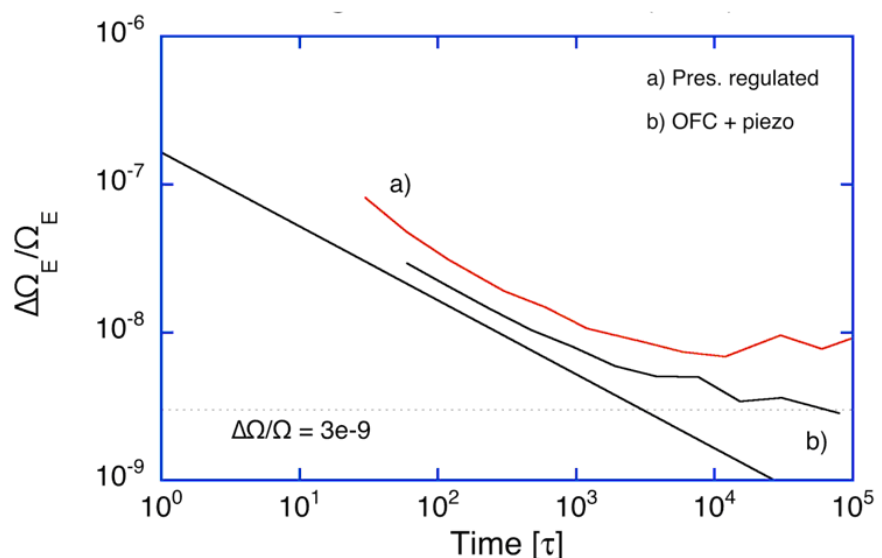


Abbildung 2-2: Relative Allan-Standardabweichung mit und ohne Stabilisierung der optischen Frequenz im Ringresonator

im PR1 Ringlaser in Christchurch (NZ) untersucht. Das im Forschungsprogramm vorgesehene Injection-Locking-Projekt musste vorläufig zurückgestellt werden, da der C-II Ringlaser nach dem großen Erdbeben in Christchurch noch nicht wieder in Betrieb genommen werden konnte.

Lokale Vermessung

Das lokale Vermessungsnetz Wettzell ist im Bereich der neu errichteten Twin-Teleskope erweitert und in das Gesamtnetz integriert worden. Damit liegen Verbindungsvektoren ("Local Ties") hoher Genauigkeit zwischen allen in Wettzell realisierten Raumverfahren vor. Ein kontinuierliches Monitoring der Referenzpunkte hat sich wegen des erforderlichen Standortwechsels und gelegentlich widriger Witterungsverhältnisse als nicht praktikabel erwiesen. Stattdessen wird am TTW-2 seit geraumer Zeit im 2-wöchentlichen Turnus eine Referenzpunktbestimmung durchgeführt.

Die vor allem für den G-Ringlaser wichtigen lokalen Neigungsmessungen wurden weitergeführt. Bei der Orientierungskorrektur der Ringlaser-Zeitreihen wurde basierend auf theoretischen Überlegungen die Lovezahl / eingeführt, was zu einer Verbesserung der Korrektur im halbtägigen Gezeitenband führte.

Die hydrologischen Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Sektion Ingenieurhydrologie des GFZ Potsdam wurden weitergeführt. Die hydrologischen Sensoren werden regelmäßig gewartet und die Daten stehen für die Korrektur der Gravimeterzeitreihen zur Verfügung.

2.2 Informationstechnologie, Datenaufbereitung und -archivierung

VLBI Datentransport

Durch die Vielzahl der anfallenden Beobachtungsdaten und Auswertergebnisse in der FGS im Allgemeinen und der geodätischen Observatorien im Besonderen stellt die Weiterentwicklung der Informationstechnologie eine Daueraufgabe der FGS dar. An erster Stelle ist in diesem Komplex der Transport von Daten über größere Entfernungen zu nennen. Während der Datenumfang für die Übermittlung von GNSS- oder SLR-Beobachtungsdaten vergleichsweise klein und durch Standardinternetverbindungen zu transportieren ist, müssen bei den Rohdaten der VLBI-Beobachtungen ganz andere Maßstäbe angesetzt werden. Hier geht es um mehrere Terrabyte pro Tag, die von jeder Beobachtungsstation aus zum Korrelator geliefert werden müssen. Nadelöhr ist hier die letzte Meile, da der (FGS-)Korrelator in Bonn nur eine erlaubte/finanzierte Anschlusskapazität von 1 Gbit/s hat, hier aber gleichzeitig mehrere Datenströme der gleichen Bandbreite von den Beobachtungsstationen einlaufen müssen. In der letzten Programmperiode wurden an dieser Stelle zwar Optimierungen realisiert, die zu einer viel besseren Auslastung der Leitungen geführt hat, am grundlegenden Engpass hat sich aber leider nichts ändern lassen. Das liegt insbesondere daran, dass das DFN für 2 GByte/s (Duplex) ca. 185.000 € pro Jahr fordert.

Bei der Automatisierung von Routineprozessen im Korrelationsablauf konnten durch fortlaufende Programmentwicklungen an vielen Stellen Arbeitsschritte standardisiert und vereinfacht werden. Dies hat zu einem erhöhten Datendurchsatz und zu einer größeren Zuverlässigkeit geführt. Das geodätische Observatorium Wettzell ist mit 1 Gbit/s an das DFN angeschlossen. Mittlerweile werden alle Daten der VLBI-Experimente als e-Transfer nach dem Experiment mit bis zu 600 Mbit/s nach Bonn, Washington, Tsukuba und Haystack übertragen (nur der Korrelator in Socorro wird noch mittels Kurierdienst beliefert). Die „Intensives“ am Wochenende werden scanweise als e-VLBI in Echtzeit nach Tsukuba transportiert, so dass innerhalb von Minuten nach Abschluss des Experiments

Korrelationen und UT1-UTC-Ergebnisse vorliegen. In Wettzell werden zur Speicherung Mark5-Module oder RAID-Systeme eingesetzt.

Daten- und Projektportale

Das IERS Daten- und Informationssystem (IERS DIS) wurde fortlaufend weiterentwickelt, um neue Datensätze – insbesondere aus dem Bereich der geophysikalischen Fluide – einzubeziehen und dem internationalen Nutzerkreis über eine zentrale Seite zugänglich zu machen (www.iers.org). Operationell verfügbare Datensätze werden täglich aktualisiert und die dazugehörigen Metadaten automatisch erzeugt. Auf der IERS-Webseite wurde außerdem ein interaktives Datenanalysetool verfügbar gemacht, das die Visualisierung und Vergleiche der IERS-Erdrotationszeitreihen erlaubt.

Im Rahmen der DFG Forschergruppe „Referenzsysteme“ (FOR 1503) wurden diverse Plot- und Analysetools zur Visualisierung und zum Vergleich von Modellen zur Auflastdeformation durch geophysikalische Fluide entwickelt. Diese Tools sind über die Webseite der Forschergruppe allgemein verfügbar (www.referenzsysteme.de).

In der zweiten Phase der DFG-Forschergruppe „Erdrotation und globale dynamische Prozesse“ (FOR 584) wurde innerhalb des Projektes ERIS (Earth Rotation Information System) ein Earth Rotation Simulation Tool entwickelt. Mit diesem Tool können verschiedene Erdrotationszeitreihen (z.B. die IERS C04 Reihe) mit Modellen oder Anregungsfunktionen kombiniert werden, um die gegenseitigen Wechselwirkungen zu analysieren und zu visualisieren (www.erotation.de).

Die Architektur und die Grundfunktionalitäten für das GGOS-Portal wurden realisiert (www.ggos-portal.org) und die Verlinkung zu den IAG-Diensten ist hergestellt. Der Bestand der Internationalen Datenbank für Absolutschweremessungen AGrav konnte weiter ausgebaut werden und umfasst nun über 3000 Beobachtungsepochen auf mehr als 1000 Stationen. Dazu haben 44 Institutionen aus 26 Ländern mit 50 Absolutgravimetern (Stand März 2015) beigetragen. Das offene Webportal OpenADB für Altimeterdaten wurde ausgebaut und aktualisiert. Neben den Meeresspiegelhöhen der historischen und aktuellen Missionen sind auch abgeleitete Produkte, wie Gezeitenmodelle und Ozeantopographie abrufbar (<http://openadb.dgfi.tum.de>).

2.3 Methodische Grundlagen und Verfahren

Das FGS-Forschungsprogramm 2011-2015 hat sich auch den methodischen Grundlagen und Verfahren gewidmet, die mit der Prozessierung und Detailanalyse der gewonnenen Daten einhergeht. Dabei war die Thematik in die klassischen Gebiete Geodätische Punktfelder (Geometrie), Orientierung und Rotation der Erde und Schwerfeld sowie Meeresoberfläche eingeteilt.

Punktfelder

Die Arbeiten der FGS auf dem Gebiet der geodätischen Punktfelder bilden seit vielen Jahren einen Schwerpunkt im Forschungsprogramm. Die FGS hat im Berichtszeitraum ein breites Spektrum an Forschungsarbeiten zu diesem Thema bearbeitet und sich intensiv an den wissenschaftlichen Diensten der IAG beteiligt (siehe Anhang D) und ein breites Spektrum an Forschungsarbeiten zu diesem Thema bearbeitet. Eine detaillierte Zusammenstellung der erzielten Ergebnisse und Veröffentlichungen sowie eine Bilanzierung sind im Dokument „Bilanz des FGS Forschungsprogramms 2011 – 2015“ dargestellt.

Zusammenfassend kann die Bilanz so gezogen werden, dass alle Themen des gegenwärtigen Forschungsprogramms erfolgreich bearbeitet wurden und insgesamt eine gute internationale Sichtbarkeit der Arbeiten

erzielt werden konnte. Auf dem Gebiet der globalen Referenzsysteme ist die FGS maßgeblich beteiligt an der Realisierung des terrestrischen und des zälestischen Referenzsystems. Die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet wurden wesentlich unterstützt durch Beiträge aus vier Projekten der DFG-Forschergruppe „Referenzsysteme“ (FOR1503). Schwerpunkte der Arbeiten waren insbesondere die Verbesserung der Kombination der Beobachtungsverfahren durch Verwendung von Ko-Lokationen auf der Erde und im Weltraum, die konsistente Bestimmung des terrestrischen und zälestischen Referenzrahmens (ITRF und ICRF) und der EOP-Zeitreihen, Untersuchungen zur verbesserten Datumsfestlegung des ITRF sowie Beiträge zu den internationalen ICRF-3-Arbeiten. Es wurden verschiedene Ansätze zur Behandlung nicht-linearer Stationsbewegungen entwickelt und in verschiedenen TRF-Berechnungen getestet: a) erweiterte geophysikalische Modelle zur Berücksichtigung von Auflastdeformationen, b) verbesserte Parametrisierung der zeitabhängigen Stationsbewegungen und c) die Berechnung zeitlich hochaufgelöster (z.B. wöchentlicher) Epochenreferenzrahmen. Weitere Themen waren die verbesserte Modellierung von GNSS- und SLR-Satellitenbahnen und die Kombination dieser Beobachtungsverfahren unter Verwendung von Ko-Lokationen auf Satelliten.

Auch auf dem Gebiet der regionalen Referenzsysteme lieferte die FGS wesentliche Beiträge zum europäischen Referenzrahmen EUREF und zum südamerikanischen Referenzrahmen SIRGAS. Im Bereich der Punktpositionierung beschäftigte sich die FGS primär mit den geometrischen Raumbeobachtungsverfahren GNSS, SLR und VLBI sowie über eine Kooperation mit tschechischen Partnern auch mit DORIS. Schwerpunkte waren u.a. Arbeiten zur Verbesserung des GNSS-Strahlungsdruckmodells, Studien im Rahmen von MGEX, die Berechnung einer SLR-Multisatellitenlösung sowie Arbeiten zur echtzeitnahen Positionierung mit GNSS (z.B., RTCM, Bahn- und Uhren-Korrekturen, PPP). Schließlich wurde auch intensiv an einer Verbesserung der physikalischen Modellierung der Beobachtungsverfahren und der Hintergrundmodelle gearbeitet.

Erdorientierung

Zur Orientierung und Rotation der Erde wurden von der FGS verschiedene Arbeiten und Untersuchungen durchgeführt. Wesentliche Beiträge zu diesem Forschungsthema lieferten mehrere Projekte, die von FGS-Mitarbeitern im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Erdrotation und globale dynamische Prozesse“ (FOR584) bearbeitet wurden. Eine gemeinsame Schätzung von Erdrotationsparametern (EOP) und des terrestrischen Referenzrahmens (Stationskoordinaten und Geschwindigkeiten) wurden bei der DTRF2008 Berechnung vorgenommen. Eine gegenseitige Qualitätskontrolle erfolgte durch Vergleiche mit dem ITRF2008 sowie der EOP 08 C04 Reihe vom IERS. Weiterhin wurden die EOP aus der klassischen Mehrjahreslösung mit den EOP-Ergebnissen der Epochenreferenzrahmen verglichen und aus den Resultaten der Einfluss nicht-linearer Stationsbewegungen auf die EOP studiert. Die im Berichtszeitraum berechnete SLR-Multisatellitenlösung lieferte eine gute Grundlage, um die Korrelation zwischen EOPs, Bahnelementen, Stationskoordinaten und niederen harmonischen Koeffizienten des Erdschwerefeldes zu studieren. Weiterer Gegenstand der Arbeiten war die konsistente Kombination von VLBI und GNSS zur verbesserten Bestimmung hochaufgelöster Erdrotationsparameter. Schließlich wurde im Berichtszeitraum erstmals eine konsistente Schätzung von TRF, CRF und EOP aus der Kombination von VLBI-, GNSS- und SLR-Zeitreihen vorgenommen und die Ergebnisse mit einer reinen VLBI-Lösung und den IERS-Produkten verglichen.

Meeresoberfläche

Forschungsarbeiten zum präzisen Monitoring der Meeresoberfläche erfordern eine hochgenaue und langzeitliche Datengrundlage in einem konsistenten Bezugssystem. Im Berichtszeitraum wurden die Daten neuer Altimetersatelliten erschlossen (HY-2A, Cryosat, Saral) und die Auswertung neuer Sensortechnologien (SAR, Ka-Band Altimeter) vorangetrieben. Des Weiteren wurden theoretische Konzepte und Softwaremodule zur Kombination und gegenseitigen Kalibrierung aller Missionen (Multi-Missions-Altimetrie) weiterentwickelt und damit die Grundlage für zahlreiche ozeanographische Auswertungen gelegt. Mit den aufbereiteten Datenreihen erfolgte die Bearbeitung von drei ozeanographischen Schwerpunktthemen: 1) Monitoring von geostrophischen Ozeanströmungen, 2) Ozean-Gezeitenmodellierung sowie 3) hochauflösende Schwerefeldbestimmung. Durch die Kombination eines hochpräzisen statischen GOCE-Schwerefeldes mit den Messungen der Altimetrie wurde eine zeitvariable dynamische Ozeantopographie (sogenannte iDOT) berechnet, aus der sich Informationen über Oberflächen-Strömungsmuster und deren zeitlichen Variationen ableiten lassen. Weiterhin wurde ein globales empirisches Ozeangezeitenmodell berechnet (EOT11a), das auch international weite Verwendung findet. Dieses Modell wurde mit GRACE-Beobachtungen kombiniert (EOT11ag), um eine Stabilisierung in für die Altimetrie schwierigen Bereichen (Küsten und Polargebiete) zu gewährleisten. Außerdem wurde ein Verfahren zur Nutzung von Altimeterdaten für die Ableitung hochgenauer kleinräumiger regionaler mariner Schwerefeldinformationen entwickelt. Auch dabei wurde eine Kombination mit anderen Messverfahren realisiert, z.B. GRACE und GOCE, um die unterschiedlichen spektralen Informationen der Verfahren bestmöglich zu nutzen.

Schwerefeld

Forschungsarbeiten im Bereich Schwerefeld beschäftigten sich schwerpunktmäßig mit der Modellierung des stationären Anteils des Schwerefeldes. Die operationelle Auswertung der Daten der am 11.11.2013 zu Ende gegangenen GOCE-Mission wurde im Auftrag der ESA im Rahmen der GOCE High-Level Processing Facility (HPF) in München koordiniert.

Neben der Vorprozessierung der Gravitationsgradiometrie-Daten und der Validierung von Orbits und Schwerefeldprodukten wurden bislang fünf GOCE-Schwerefeldmodellen nach der „time-wise“-Methode (TIM-Modelle) berechnet. Umfassende Arbeiten zur Schwerefeldbestimmung aus SLR unterstützen eine bessere Bestimmung der niedrigen harmonischen Koeffizienten als wesentlicher Beitrag zur Konsistenz von Geometrie und Schwerefeld. Darüber hinaus wurden unter der Verantwortung von IAPG bislang vier globale Satellitenmodelle der GOCO-Reihe berechnet, die eine Datenkombination aus GRACE, GOCE, kinematischen Bahndaten diverser niedrigfliegender Satelliten und SLR-Daten darstellen. Außerdem wurden hoch aufgelöste stationäre Schwerefeldmodelle auf Basis voller Normalgleichungen bis Grad/Ordnung 720 aus der Kombination von terrestrischen, altimetrischen und Satellitendaten berechnet.

Entscheidend für die Schwerefeldbestimmung ist ein umfassendes Verständnis der verschiedenen Satellitensensoren. So wurde für GOCE eine verbesserte Methode zur Trennung von linearen und rotatorischen Beschleunigungen entwickelt, die zu einer signifikanten Verbesserung der GOCE-Produkte geführt hat. Darüber hinaus wurden in umfassenden Arbeiten die typischen GRACE-Twangs im Detail analysiert und Methoden für deren Reduktion entwickelt.

Die regionale Schwerefeldbestimmung mithilfe einer Multi-Skalendarstellung (MSD) wurde weiterentwickelt und für eine Kombination verschiedener Beobachtungstechniken ausgelegt. Zu diesem Zweck wurde ein umfangreiches Softwarepaket erstellt, mittels dessen beispielsweise

aus GRACE, GOCE und hochaufgelösten Oberflächendaten (z.B. terrestrische Gravimetrie und Fluggravimetrie) hochgenauer regionale Geoidmodelle erzeugt wurden (siehe auch der voranstehende Punkt „Meeresoberfläche“). Zudem wurde die Entwicklung einer regionalen Analyse-methode basierend auf Tesseroiden durchgeführt.

Im Berichtszeitraum wurde verstärkt die geodätische und geowissenschaftliche Nutzung der neuen Schwerefeldmodellgenerationen (stationäres und zeitvariables Schwerefeld) forciert. Im Rahmen des SPP1257 (siehe auch Absatz 2.4) wurden Projekte zur Ableitung der dynamischen Ozeantopographie und geostrophischer Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Regionale Schwerefeld-Kombinationsmodelle wurden für eine Vielzahl an Anwendungen berechnet, z.B. für die Andenregion als Basis für die geophysikalische Modellierung der Subduktionszone, für die Arabischen Halbinsel zur Geoexploration oder für Norddeutschland zur Bestimmung eines hochgenauen Geoidmodells. Im Rahmen von ESA-Projekten wurden Studien zur globalen Vereinheitlichung von Höhensystemen und zur Bestimmung robusterer Eismassen-Trends aus GRACE-Daten durchgeführt sowie eine verbesserte Modellierung der postglazialen Landhebung (GIA) in der Antarktis aus einer Datenkombination von Schwerefeld, Altimetrie und GNSS untersucht. Außerdem wurde die Eignung der GOCE-Daten zur Beobachtung des 2011 Tohoku-Oki Erbebens sowie der Eismassenbilanz der West-Antarktis erforscht.

Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Entwicklung, Analyse und Simulation zukünftiger Satellitenmissionskonzepte. Zwei numerische Simulatoren wurden signifikant weiterentwickelt, um in einer Closed-Loop-Umgebung für unterschiedliche Missionskonzepte die erzielbare räumliche und zeitliche Auflösung sowie Genauigkeit in Abhängigkeit der Fehlercharakteristiken der Sensoren und der Bahnkonfiguration im Detail zu analysieren. Außerdem wurden Studien zur Verringerung der Aliasing-Problematik, zur verbesserten Parametrisierung zeitvariabler Signale und zu Anforderungen an die Rechengenauigkeit bei zukünftig signifikant verbesserte Sensorgenauigkeiten durchgeführt. Im Rahmen eines DLR-Projekts, koordiniert durch IAPG, wurde in Vorbereitung auf die nächste ESA-Ausschreibung des Earth Explorer Programms ein Missionsvorschlag für eine zukünftige Schwerefeldmission erarbeitet. Ebenfalls wurde eine internationale IUGG-Initiative zur Konsolidierung von Nutzeranforderungen für ein nachhaltiges zukünftiges Schwerefeldbeobachtungssystem als Teil der GGOS-Infrastruktur koordiniert.

2.4 Verbindung mit Erdwissenschaften

Neben der Bereitstellung von Beobachtungen trägt die Geodäsie über numerische Modellierung zur Erdsystemforschung bei und liefert die metrologische Grundlage zur Beschreibung von dynamischen Prozessen im Erdsystem. Geprägt waren die Arbeiten der FGS zur Erdsystemforschung im Berichtszeitraum insbesondere durch das DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1257 „Massentransporte und Massenverteilung im System Erde“ sowie der DFG-Forschergruppe „Erdrotation und globale dynamische Prozesse“ (FOR 584). Mitarbeiter der FGS waren im SPP 1257 an mehr als zehn Projekten beteiligt. Diese zielten u.a. auf die Detektion von Massenbewegungen (z.B. Ozeangezeiten, dynamische Ozeantopographie) aus der Kombination von Daten der Satellitengravitationsfeldmission GRACE mit Messungen anderer Beobachtungstechniken wie z.B. die Satellitenaltimetrie oder die terrestrische Gravimetrie ab. Verbesserte De-Aliasing Produkte zur Erstellung globaler Gravitationsfeldmodelle wurden ebenso entwickelt wie Methoden zur Trennung der integralen GRACE-Beobachtungen in die Anteile verschiedener Erdsystemkomponenten.

FGS-Mitarbeiter waren im Rahmen der FOR 584 an sechs Projekten beteiligt. Stellvertretend seien hier die Arbeiten zur Detektion subtäglicher und episodischer Variationen der Erdrotation sowie die Bestimmung von physikalischen Modellparametern (z.B. die Love'sche Zahl k_2 der Polgezeit) mittels der Euler-Liouville'schen-Differentialgleichung genannt.

Hydrologie

Wichtige Aspekte der kontinentalen Hydrologie wurden nicht nur innerhalb des SPP 1257 bearbeitet. Erheblicher Aufwand wurde in den Aufbau des neuen Datenportals DAHITI für Produkte der Inlandaltimetrie investiert. Seit 2013 werden über DAHITI (Database for Hydrological Time Series of Inland Waters) aus Multi-Missions-Satellitenaltimetrie berechnete Wasserstandszeitreihen von Seen, Flüssen und Feuchtgebieten zur Verfügung gestellt. Da die Anzahl der im Global Runoff Data Center (GRDC) registrierten Flusspegelstationen seit 1980 weltweit kontinuierlich abnimmt, besteht ein großer Bedarf an satellitenbasierten alternativen Beobachtungsdaten. In weiteren Projekten wurden Multi-Sensor-Satelliten-daten genutzt, um Volumenänderungen von Oberflächengewässern im Kontext von Extremwetterereignissen, anthropogenen Eingriffen und des Globalen Wandels zu quantifizieren

Atmosphäre

Im Themenbereich Atmosphäre wurden im Berichtszeitraum zahlreiche Projekte zur Ionosphäre bearbeitet. In der modernen Geodäsie wird die Atmo-/Ionosphäre nicht mehr nur als Störgröße sondern auch als Zielgröße gesehen. Im Kontext der zweiten Betrachtungsweise wurde in einem DFG-geförderten Projekt die Elektronendichte innerhalb der Ionosphäre regional aus der Kombination geodätischer Beobachtungsverfahren modelliert. Der Fokus zweier weiterer laufender Projekte liegt insbesondere in der Daten-adaptiven Modellierung des absoluten totalen Elektronengehalts (VTEC) der Ionosphäre. Mit dem gewählten Ansatz werden globale VTEC-Karten für aktuelle Zeitpunkte sowie Prädiktionen für folgende Tage gerechnet. Ein besonderes Ziel dieser Arbeiten ist die Einbindung solarer Informationen, z.B. in Form von Sonnenwind-daten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Berichtszeitraum intensiv und erfolgreich an den im Forschungsprogramm festgelegten Themenbereichen gearbeitet wurde. Die Tabellen C-2 und C-3 enthalten eine detaillierte Zusammenstellung aller laufenden und beendeten Drittmittelprojekte, die thematisch in Verbindung zu den Erdwissenschaften standen oder stehen. Im Dokument „Bilanz des Forschungsprogramms 2011 – 2015“ sind die erzielten Ergebnisse aufgelistet sowie Veröffentlichungen angegeben. Die DFG-Projektprogramme SPP 1257 und FOR 584 sind mittlerweile weitgehend ausgelaufen. Zuletzt haben zahlreiche DFG-Rundgespräche zu neuen Programmen stattgefunden; die DFG-Schwerpunktprogramme „Dynamic Earth“ und „Sea Level“ wurden mittlerweile genehmigt. Im ersten Fall wurden für die erste dreijährige Antragsphase bereits Anträge eingereicht; unter den Antragstellern befinden sich auch verschiedene FGS-Mitglieder. Weitere Einzel-, Bündelanträge, etc. wurden eingereicht oder sind geplant (Drittmittelgeber: DFG, IGSSE, ESA, etc.).

2.5 Beteiligung der FGS an den Internationalen Diensten

Die Mitgliedsinstitutionen der FGS haben im Berichtszeitraum ihre Verpflichtungen im Rahmen der internationalen Dienste erfolgreich erfüllt und zum Teil erheblich ausgebaut. Verbunden damit ist eine beachtliche internationale Sichtbarkeit, die wiederum zu zahlreichen weiteren internationalen wissenschaftlichen Kooperationen geführt hat. An dieser Stelle wird auf eine Benennung einzelner Dienstkomponenten verzichtet, da

diese in ihrer Gesamtheit in Anhang D dargestellt werden. Es sollte aber erwähnt werden, dass die FGS durch ihre über Jahrzehnte verfolgte Strategie einer guten internationalen Vernetzung zum Zustandekommen der UN Resolution „A global reference frame for sustainable development“ beigetragen hat, die am 26. Februar 2015 durch die UN-Generalversammlung verabschiedet wurde.

3 Forschungsprogramm 2016-2020

Das vorliegende Forschungsprogramm wurde ausgehend von den in Kapitel 1 ausgeführten allgemeinen Anforderungen an die Geodäsie im Rahmen der Erdsystemforschung und des Verständnisses der globalen Veränderungsprozesse entwickelt. Es führt das Forschungs- und Entwicklungsprogramm von 2011-2015 weiter. Einbezogen wurden auch die absehbare technologische Entwicklung im Bereich der Sensorik sowie das langfristige Ziel einer relativistischen Geodäsie. Zentrale Aufgabe der FGS ist die kontinuierliche Bereitstellung geodätischer Messzeitreihen höchster Qualität und die stetige Verbesserung der Messsysteme im Geodätischen Observatorium Wettzell, um dessen Spitzenstellung im internationalen Vergleich sicherzustellen. Mit der Weiterentwicklung der Messsysteme und der Analyse- und Kombinationsmethodik leistet die FGS einen relevanten Beitrag zum Aufbau eines integrierten geodätischen Beobachtungssystems und zu dessen Nutzung für die Erdsystemforschung. Den Beitrag zu den wissenschaftlichen Diensten und die Mitarbeit an zentralen Stellen zur Gestaltung der internationalen wissenschaftlichen Programme sieht die FGS als eine strategische Langfristaufgabe.

Schwerpunkte des Forschungsprogramms

Die in diesem Dokument zusammengefassten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben gliedern sich in drei thematische Schwerpunkte, welchen jeweils zwei Ziele zugeordnet sind. Aus diesen Zielen werden wiederum eine Reihe von Zielstellungen (Objectives) abgeleitet, aus denen sich schließlich jeweils mehrere Aufgaben ergeben. Diese Aufgaben sollen in der nächsten Projektperiode weitergeführt oder angegangen werden. Die drei dem Programm zugrunde gelegten Themenschwerpunkte sind

- (1) **Raumbezug** mit zwei Zielen, welche einerseits die Sicherung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Einzelverfahren, andererseits die Realisierung eines konsistenten integrierten Raumbezugs adressieren;
- (2) **Monitoring geophysikalischer Prozesse**, einerseits fokussiert auf lokale Prozesse in der Umgebung des Geodätischen Observatoriums Wettzell, andererseits auf globale geophysikalische Prozesse;
- (3) **Infrastruktur**, zum einen bezogen auf technisch-technologische Entwicklungen, zum andern auf die strategische Positionierung der FGS im internationalen Umfeld.

Der Beitrag zur Realisierung eines hochpräzisen und stabilen Raumbezugs durch entsprechende technologische und methodische Entwicklungen spielt bei den geplanten Arbeiten der FGS eine zentrale Rolle. So sind alle Institutionen der FGS maßgeblich beteiligt an der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschergruppe FOR 1503 mit dem Titel „Space time reference systems for monitoring global change and for precise navigation in space“. Die Rolle des Sprechers wird von Axel Nothnagel (IGG, Universität Bonn) wahrgenommen. In einer ersten Phase von 2012 bis 2014 wurde das Projekt mit insgesamt 2,2 Mio € gefördert. Die Arbeiten können dank einer Fortsetzungsbewilligung in einer zweiten Phase von 2015 bis 2017 weitergeführt werden.

Auch der Schwerpunkt „Monitoring geophysikalischer Prozesse“ stellt ein zentrales Forschungsfeld der FGS dar. Zum einen ist es wichtig, lokale Effekte am Observatorium und dessen näheren Umgebung zu überwachen und zu verstehen, um geometrische, gravimetrische und atmosphärische Korrekturen für die am Observatorium erzeugten Beobachtungszeitreihen zu ermitteln. Zum anderen spielt die Geodäsie eine bedeutende Rolle bei der Beobachtung und Messung geophysikalischer Prozesse

im System Erde sowie deren Modellierung und Interpretation, einer Aufgabe, welche die FGS in enger Kooperation mit den geophysikalischen Disziplinen wahrnimmt.

Schliesslich ist das Thema „Infrastruktur“ für das Geodätische Observatorium als Infrastruktureinrichtung von großer Bedeutung ist. Viele der Aufgaben erfordern Infrastrukturmassnahmen im Rahmen des mit den verfügbaren Mitteln Möglichen (zur haushaltsmäßigen Absicherung des Forschungs- und Entwicklungsprogramms siehe Anhang C). Unter Infrastrukturaufgaben sind aber durchaus auch die Beiträge zu und aktive Mitarbeit in den wissenschaftlichen Diensten zu verstehen. Hier nimmt die FGS eine aktive Rolle ein zur Gestaltung internationaler Projekte. Stellvertretend erwähnt sei hier lediglich die im Rahmen der FGS geleisteten Arbeiten im GGOS Büro für Produkte und Standards (BPS) erwähnt. Die vollständige Liste der Beiträge zu den wissenschaftlichen Organisationen und Diensten findet sich im Anhang D.

Wechselbeziehungen zwischen den Schwerpunkten

Auch wenn die drei Schwerpunkte die Themenbereiche abdecken, in welchen die FGS arbeitet, bestehen vielfältige wechselseitige Beziehungen zwischen diesen Schwerpunkten. Viele der Ziele sind mit Aufgaben verknüpft, welche verschiedenen Themenschwerpunkten zugeordnet werden können. So ist beispielsweise das Monitoring geophysikalischer Prozesse eng mit Raumbezug verknüpft, die Weiterentwicklung der Messtechnologien am Geodätischen Observatorium Wettzell ist eine Infrastrukturaufgabe, dient aber der Realisierung eines präziseren und stabileren Raumbezugs. Die übergeordneten Schwerpunkte könnten daher durchaus auch anders aussehen. Mehrere weitere zentrale Themenschwerpunkte finden sich daher in mehreren der gewählten Schwerpunkte wieder.

So findet sich das Kernthema Zeit und Frequenz in mehreren Zielen in den Schwerpunkten „Raumbezug“ und „Infrastruktur“ wieder. Eine zentrale Rolle wird die Realisierung eines für alle Messsysteme des Observatoriums gleichermaßen verfügbaren konsistenten Zeitsystems spielen, da diese in der Analyse als gemeinsame Parameter und damit als Verknüpfungen der Messsysteme („local ties“) genutzt werden können. Die rasante Entwicklung immer stabilerer Uhren macht deren Nutzung im Rahmen einer relativistischen Geodäsie absehbar. In der Folge werden sich Geodätische Observatorien zu Raum-Zeit-Observatorien entwickeln.

Die Erfassung und Überwachung atmosphärischer Zustandsgrössen (Schwerpunkt „Monitoring geophysikalischer Prozesse“) erfordert den Ausbau entsprechender Sensorik wie des Footprint-Netzes und Ko-Lokations-Targets am geodätischen Observatorium (Schwerpunkt „Infrastruktur“) und ist von Bedeutung für die Ableitung von präzisen Korrekturgrössen für die erfassten raumgeodätischen Beobachtungszeitreihen zur Realisierung eines hochgenauen und langzeitstabilen globalen Referenzrahmens (Schwerpunkt „Raumbezug“). Atmosphärische Korrekturen können als gemeinsame Parameter der verschiedenen Messtechniken bestimmt werden zur Stärkung der lokalen Verbindungsvektoren (troposphärische „local ties“). Schliesslich können die Messinstrumente am Observatorium als ein atmosphärischer Sensor genutzt werden. Erwähnt seien hier lediglich die vier verfügbaren Frequenzen der beiden SLR-Systeme.

In gleicher Weise ist das Monitoring nichtlinearer Stationsbewegungen wichtig zur Entwicklung und Validierung entsprechender geophysikalischer Modelle und zum Verständnis der relevanten Veränderungsprozesse im System Erde, aber auch zur Realisierung eines stabilen globalen Referenzrahmens, der die von GGOS gesetzten Ziele erfüllt. Die Realisierung eines hochstabilen Raumbezugs erfordert die Einhaltung

homogener Standards über alle Techniken. Der Betrieb des Bureau of Products and Standards durch die FGS ist dabei eine zentrale Infrastrukturaufgabe im Rahmen von GGOS. Alle am geodätischen Observatorium erfassten Beobachtungen und abgeleiteten Produkte werden den wissenschaftlichen Diensten der IAG zur Nutzung durch die wissenschaftliche Gemeinschaft zur Verfügung gestellt. Dies ermöglicht der FGS wiederum den vollen Zugang der global erfassten Daten sowie das Einnehmen einer zentralen Rolle in den Diensten zur Gestaltung der internationalen wissenschaftlichen Programme als strategische Infrastrukturaufgabe.

Tabelle 1-1 gibt eine Übersicht über die den drei Schwerpunkten zugeordneten Zielstellungen (Objectives).

Tabelle 1-1: Schwerpunkte und Objectives

Schwerpunkt 1	Raumbezug
Objective 1	GGOS-Konformität des Geodätischen Observatoriums Wettzell
Objective 2	Weiterentwicklung der geodätischen VLBI im Rahmen von VGOS
Objective 3	Integrierte Nutzung der Daten des GREF-Stationsnetzes
Objective 4	Konsistente Verknüpfung der Messsysteme und Raumverfahren
Objective 5	Konsistente Realisierung eines integrierten Raumbezuges
Objective 6	Nutzung neuer Messsysteme und Beobachtungstechniken
Objective 7	Einbindung des G-Ringlasers in die Bestimmung von Erdrotationsparametern
Objective 8	Konsistente Integration und konsequente Nutzung von Zeit und Frequenz in den Weltraumverfahren
Schwerpunkt 2	Monitoring geophysikalischer Prozesse
Objective 1	Verbesserte Erfassung und Modellierung der atmosphärischen Zustandsgrößen über Wettzell
Objective 2	Monitoring und Modellierung von Deformationen in der Region Wettzell
Objective 3	Korrektur atmosphärischer und hydrologischer Attraktionseffekte auf Gravimeter und Tiltmeter
Objective 4	Monitoring des statischen und zeitvariablen Schwerefeldes
Objective 5	Monitoring von Deformationsprozessen auf unterschiedlichen Skalen
Objective 6	Dynamische Prozesse im Erdsystem
Schwerpunkt 3	Infrastruktur
Objective 1	Operationeller Messbetrieb im Rahmen der internationalen Dienste der IAG
Objective 2	Aktive Beteiligung in den Diensten der IAG
Objective 3	Standardisierung für einen konsistenten Raumbezug
Objective 4	Automatisierung
Objective 5	Weiterentwicklung der geodätischen VLBI im Rahmen von VGOS
Objective 6	Einheitliche Zeitbasis an den geodätischen Observatorien
Objective 7	Erweiterung des Sensornetzwerks um Wettzell
Objective 8	Sicherung von Nachhaltigkeit und Stabilität des GREF-Stationsnetzes und Qualität der Beobachtungsdaten
Objective 9	Sicherstellung der Schwerereferenz für Deutschland
Objective 10	Datenhaltung und Bereitstellung der Mess- und Modellzeitserien

Schwerpunkt 1 Raumbezug

Ziele

- **Sicherung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Einzelverfahren**

Im Rahmen der vorgesehenen Arbeiten verfolgt die FGS das Ziel, einen präzisen und langfristig stabilen Raumbezug zu schaffen sowie die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit ihrer Ergebnisse sicher zu stellen. Ausgangspunkt für die Definition dieser Ziele sind die Vorgaben des GGOS, zu denen die FGS mit Ihren Arbeiten beitragen möchte. In diesem Zusammenhang spielen naturgemäß auch eine höchstmögliche Genauigkeit und ihre Zuverlässigkeit eine Rolle, die durch die einzelnen Beobachtungsverfahren sichergestellt werden müssen. Unabdingbar dafür ist, dass die Produkte der Techniken und dabei insbesondere die Referenzsysteme eine langfristige Stabilität aufweisen. Gleichzeitig ist es natürlich das erklärte Ziel, die Genauigkeit der Einzelverfahren weiter zu steigern. Dies betrifft sowohl die Genauigkeit der Einzelbeobachtungen als auch die optimale Auswertung der Beobachtungsdaten. Im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit und Nutzbarkeit kommt es darauf an, dass die Ergebnisse zeitnah produziert werden, um die Gegebenheiten echtzeitnah darstellen und Prädiktionen latenzfrei realisieren zu können.

- **Weiterentwicklung der Modellbildung und Standardisierung für einen konsistenten integrierten Raumbezug durch Kombination von Geometrie und Gravimetrie**

Die FGS setzt sich das Ziel, die verschiedenen Beobachtungsverfahren zu integrieren und kombinierte Produkte zu erzeugen, um die größtmögliche Konsistenz zu erreichen. Für das Erreichen dieses Ziels spielt die Reduktion systematischer Fehler in den einzelnen Beobachtungsverfahren eine entscheidende Rolle. Dabei sind sowohl Verbesserungen im beobachtungstechnischen Bereich als auch in den methodischen Ansätzen zur kombinierten Datenanalyse erforderlich. Hinsichtlich einer Verbesserung der kombinierten Produkte (insbesondere bei der Realisierung der Referenzsysteme) zielen die Arbeiten der FGS darauf ab, dass neue und/oder zusätzliche Beobachtungsdaten bestmöglich integriert werden können. Um dies zu erreichen, muss einerseits die Modellbildung im Rahmen der Analyse weiterentwickelt werden. Andererseits müssen Standardisierungen im internationalen Umfeld vorangebracht werden. Eines der GGOS-Ziele – die Integration von Geometrie, Schwere und Orientierung der Erde – ist ein erklärtes Ziel der FGS. Insbesondere die umfassende Realisierung des integrierten Raumbezugs für Geometrie und Schwere im nationalen und globalen Rahmen erfordert noch diverse Weiterentwicklungen der Auswertemethoden.

Zur Erreichung dieser Ziele sind für den Programmzeitraum von 2016 bis 2020 eine Reihe von Vorgaben zu erfüllen und entsprechende Detailaufgaben zu bearbeiten.

Objective 1 GGOS-Konformität des Geodätischen Observatoriums Wettzell

Die GGOS-Initiative stellt einen wesentlichen Pfeiler zur Erreichung der übergeordneten Ziele von hoher Langzeitstabilität und Genauigkeit dar. Das Geodätische Observatorium Wettzell soll in diesem Zusammenhang als „GGOS Core Site“ fungieren und besitzt heute bereits den Status einer „GGOS Legacy Site“. Die Anforderungen an GGOS Core Sites sind dokumentiert (GGOS, 2012), wobei alle Grundanforderungen von Wettzell erfüllt werden. Eine Reihe von Verbesserungen soll jedoch zu einer mustergültigen Erfüllung der GGOS-Anforderungen führen. In diesem Zusammenhang nimmt die Bestimmung der Verbindungsvektoren zwischen den Systemen („local ties“) eine herausragende Bedeutung ein. Zwar weist das lokale Vermessungsnetz in Wettzell im Mittel Punktprecisionen zwischen 0,2 und 0,4 mm auf, dennoch sind weitere Verbesse-

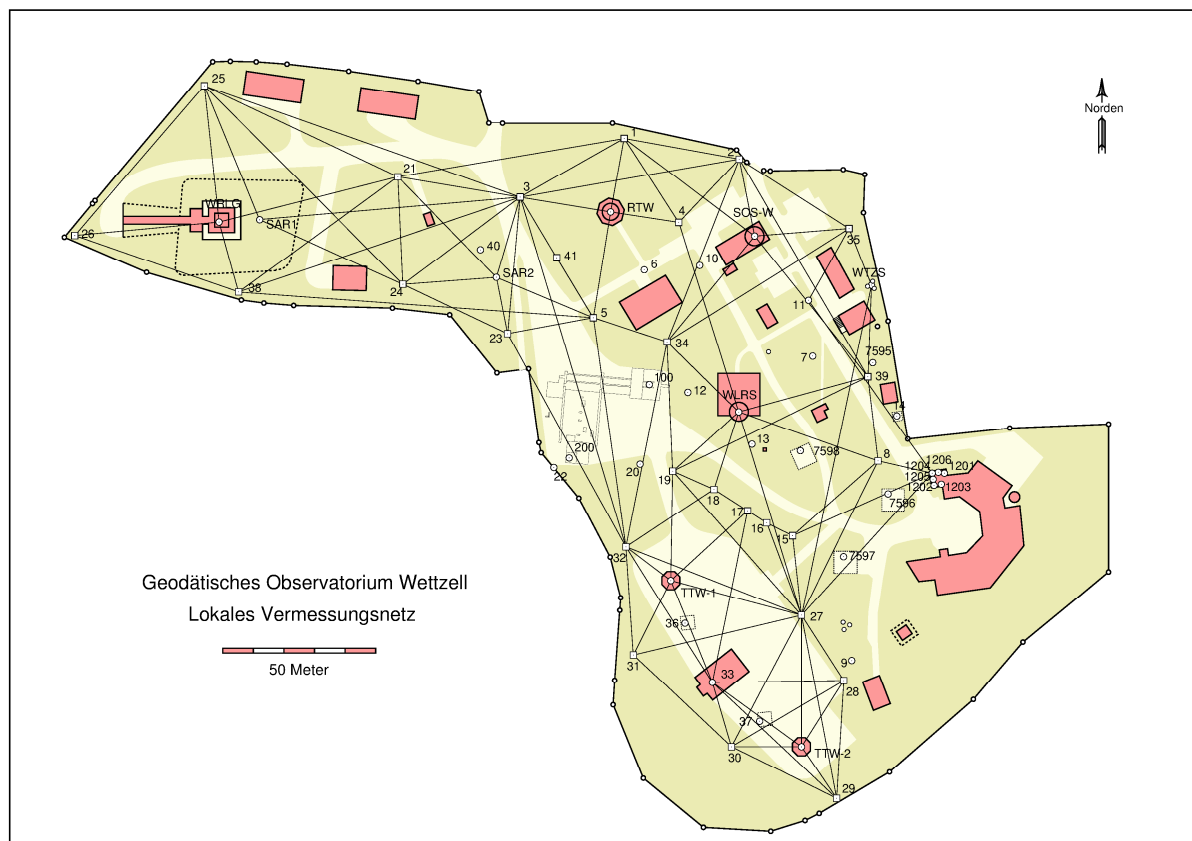


Abbildung 3-1: Lokales Vermessungsnetz des Observatoriums Wettzell

rungen realisierbar. Ebenso müssen ergänzende Techniken und Technologien genauer untersucht werden. Hieraus ergeben sich folgende Maßnahmen:

1. Geometrische Aspekte bei der Verbesserung des lokalen Vermessungsnetzes

Zwei wesentliche Probleme bestehen im gegenwärtigen Extrapolationszwang für wichtige Netzpunkte sowie dem Transformationszwang mit Hilfe von GNSS-Passpunkten. Das Extrapolationsproblem trifft insbesondere die Referenzstationen auf dem GNSS-Turm. Diese Punkte nehmen eine Randgeometrie im Vermessungsnetz ein und werden de facto über Vorwärtsschnitte bestimmt. Neben der Extrapolationsgeometrie werden hierbei die Streckenmessungen nicht genutzt. Dies soll zukünftig durch Integration mindestens eines Retro-Reflektors in Kombination mit einer geeigneten Referenzstations-Antenne (problematische Sichtverhältnisse) verringert werden, also durch Schaffung eines „Kombi-Punktes“.

Verbesserungspotential besteht bei den Maßnahmen für die Überführung der lokalen Koordinaten in geozentrische Koordinaten (oder auch Koordinatendifferenzen), wie sie letztlich in Form einer SINEX-Datei für die ITRF-Kombination zur Verfügung gestellt werden. Der Weg führt gegenwärtig über eine vollwertige Transformation mit Hilfe von GNSS-Passpunkten. Diese werden in der Mehrzahl in Kampagnen besetzt und erreichen in der Regel nicht das Präzisionsniveau der lokalen Netzausgleichung. Dies führt im weiteren Verlauf zu einer Herabsetzung der Genauigkeit des Endproduktes „geozentrische Koordinatendifferenzen“. Methoden zur Verbesserung oder sogar Abschaffung der Transformationsansätze werden intensiv untersucht und bewertet. In diesem Zusammenhang denkbar sind beispielsweise:

- *Verbesserte Einbindung von Fernzielen:* Durch diese Maßnahme kann der Transformationsparameter „Netzorientierung“ präzise bestimmt werden und müsste anschließend nicht mehr mit Genauigkeitsverlusten über lokale GNSS-Passpunkte abgeleitet werden. Diese zunächst einfach klingende Maßnahme stößt im Falle von Wettzell jedoch auf verschiedene praktische Probleme z.B. betreffend Sichtbarkeiten und erfordert durchaus genauere Untersuchungen.
- *Schaffung von Kombi-Punkten:* Durch eine verbesserte Integration des GNSS Lokalnetzes mit Lokalmessungen werden über das Stationsgelände verteilte Kombi-Punkte geschaffen. Analog zu obiger Betrachtung könnte dadurch der Transformationsparameter „Netzmaßstab“ separat und voraussichtlich präziser als bisher bestimmt bzw. geprüft werden. Dadurch verbleiben anschließend nur noch Translationen als zu bestimmende Datumparameter, deren Bestimmung und Stabilitäts-Monitoring sich bei der Verwendung von Kombinationspunkten jedoch durch eine permanente Netzauswertung ebenso ermittelbar sind. Auf positive Nebeneffekte wie die Möglichkeit der Aufstellung von Koordinaten-Zeitreihen zur Überwachung lokaler Deformationseffekte sei hingewiesen. Bislang konnten Schwankungen um ca. 0,5 mm während extremer meteorologischer Phänomene wie trockenen Sommern beobachtet werden.
- *Systematische Untersuchung der Anforderungen an die zeitliche Auflösung der Referenzpunktbestimmung:* Die Referenzpunkte der VLBI-Antennen und SLR-Teleskope sind trotz stabiler Bauweise nicht zwingend kurz- und/oder langzeitstabil.

2. Integration des Schwerefelds in die Lokalnetz-Auswertung

Neben den geometrischen Aspekten sind Verbesserungen in der Lokalnetz-Auswertung durch Integration von Schwerefeld-Informationen denkbar, deren Auswirkungen bislang nicht untersucht wurden. Zwei Varianten bieten sich an: Eine lokale Geoidmodellierung („Feinstruktur-Geoid Wettzell“) mit Hilfe von gravimetrischen Daten wäre möglich und führt zu einem Transformationsmodell für die radiale Koordinatenkomponente bei der Zusammenführung lokaler – am Schwerefeld orientierter – Vermessung und rein geometrischer GNSS-Positionierung. Schweremessungen liegen hierfür grundsätzlich vor, müssen aber eventuell verdichtet und auch räumlich ausgeweitet werden. Durch regelmäßige Wiederholungsmessungen eines lokalen gravimetrischen Netzes könnten zeitliche Veränderungen des Schwerefeldes erfasst werden, die mit regionalen und lokalen Massentransportprozessen in Verbindung stehen. Auch eine Ergänzung des Datensatzes um Lotabweichungen – wie nachfolgend diskutiert – ist denkbar

Der zweite Ansatz ist de facto eine Umkehrung der Methodik: Hier werden die lokalen terrestrischen Messungen korrigiert, um sie mit GNSS-Ergebnissen kompatibel zu machen. Der Ansatz zielt auf die Erstellung eines Lotabweichungsmodells ab, über das anschließend durch Verwendung von Rechenmethoden der mathematischen Geodäsie der Einfluss des Schwerefeldes auf die terrestrischen Messungen quantifiziert werden kann und diese auf eine ellipsoidische Rechengrundlage überführt werden könnten. Rein aus topographischen Massen abgeleitete Lotabweichungen können hier zwar zur Abschätzung der Variationen im Lokalnetz dienen, jedoch sind vollwertige Lotabweichungen für diesen Zweck zu messen, wofür die am APG verfügbare Q-Daedalus-Zenitkamera vorgesehen ist, welche auf einem Tachymeter mit CCD-Kameraaufsatz beruht.

3. Untersuchung und Einrichtung von Inter-Technik-Verknüpfungen

Neben der Kombination der raumgeodätischen Beobachtungstechniken auf der Lösungsebene werden auch Techniken zur Kombination auf experimenteller Ebene untersucht, welche beispielsweise Zeitübertragung zwischen SLR und VLBI Systemen ermöglichen. Unter Verwendung photokonduktiver Antennen können Laserpulse zur Generierung von phasenreferenzierten Mikrowellenpulsen herangezogen werden. Aufgrund der so geschaffenen quasi punktförmigen Mikrowellensignalquelle können Basislinien zwischen optischen SLR und VLBI Systemen vermessen werden. Vergleiche mit den Ergebnissen aus der lokalen Vermessung („local ties“) tragen dazu bei, systematische Abweichungen zwischen den raumgeodätischen Verfahren aufzudecken. Die Verknüpfung von mikrowellenbasierten mit optischen Messverfahren auf Zeitbasis ermöglicht weiter die Realisierung eines „kombinierten“ Raum-Zeit-Referenzpunktes.

Objective 2 Weiterentwicklung der geodätischen VLBI im Rahmen von VGOS

Zur Sicherung und Steigerung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der globalen VLBI-Messungen hat das Geodätische Observatorium Wettzell durch den Plan des Baus der Twin-Teleskope bereits 2010 die entscheidenden Weichen gestellt. In den kommenden Jahren gilt es, den eingeschlagenen Weg systematisch weiter zu verfolgen, um auf Detailebene Unzulänglichkeiten zu eliminieren sowie das Verfahren, die Hardware und die Nutzbarkeit voran zu treiben. Gleich-



Abbildung 3-2: Twin Teleskop 2 am Geodätischen Observatorium Wettzell

zeitig kann und soll mit einer weiteren Nutzung des 20m-Teleskops dafür Sorge getragen werden, dass die einzigartigen Möglichkeiten eines Triple-Teleskopclusters sowie eines großen und damit sehr empfindlichen Teleskops ausgenutzt werden können.

Die Zielsetzung des VLBI Global Observing Systems (VGOS) ist eine umfassende Steigerung der Genauigkeit globaler geodätischer und astrometrischer VLBI-Messungen. Dies wird dadurch erreicht, dass die VGOS-Teleskope sehr schnell zwischen den einzelnen Radioquellen wechseln müssen, um eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Atmosphärenabtastung zu ermöglichen. Dies geht nur mit vergleichsweise kleinen Radioteleskopen, deren reduzierte Empfindlichkeit durch eine große Empfangsbandbreite kompensiert wird. Im Vergleich zu den bis jetzt eingesetzten Empfängern mit separaten Signalwegen für S- und X-Band wird in der VGOS-Konzeption eine Horn- und Empfängerkonfiguration eingesetzt, die es erlaubt, die ganze Bandbreite von 2 GHz bis 14 GHz abzudecken. Mit der Aufzeichnung von vier aus dieser Gesamtbandbreite ausgeschnittenen Bändern von je 1 GHz, die zudem noch mit zwei rechtwinklig zueinander stehenden Polarisierungen abgetastet werden, wird eine entsprechend große digitalisierte Bandbreite erzeugt. Für erste Tests am TTW2 wurde das Elevenfeed in Auftrag gegeben, das von der Firma Omnysis in Schweden gefertigt wird. Das TTW1-Teleskop ist zurzeit mit einem X/S-Band-Empfänger für Standard-VLBI-Beobachtungen ausgerüstet. Zu diesem System gehört auch ein Ka-Band-Modul (32 GHz), das in Kürze betriebsbereit sein soll.



Abbildung 3-3: 20m Radioteleskop

Aufgrund dieser übergeordneten Vorgaben sind für die Weiterentwicklung der geodätischen VLBI im Rahmen von VGOS folgende Maßnahmen notwendig:

1. *Herstellung der Kompatibilität mit der VGOS-Breitbandtechnik*

Nach ersten erfolgreichen Labortests muss das Eleven-Feedhorn des TTW2 in Feldversuchen erprobt werden, so dass TTW2 demnächst erste Messungen mit anderen in der Entwicklung befindlichen Breitbandteleskopen insbesondere in den USA durchführen kann. Die Erfahrungen mit diesem Konzept sollen mittelfristig auch auf TTW1 übertragen werden. Des Weiteren ist zu untersuchen, mit welchen Maßnahmen das 20m Teleskop und die Teleskope in O'Higgins (GARS) und La Plata (TIGO/AGGO) auf Breitbandempfang umgerüstet werden können. Sobald Kompatibilität mit der VGOS-Breitbandtechnik hergestellt ist, sind die Teleskope in VGOS-Pilotprojekten einsetzbar und werden so automatisch Bestandteil des VGOS.

2. *Untersuchungen zur Nutzung von Ka-Band-Beobachtungen*

Da Ka-Band-Beobachtungen nicht zum Standardfrequenzbereich für geodätische Anwendungen gehören, sind weiterreichende Tests zusammen mit geeigneten Partnerteleskopen erforderlich. Sobald diese erfolgreich sind, soll eine Konzeption erfolgen, um Beiträge zu globalen Aktivitäten für einen Ka-Band-Quellenkatalog, der insbesondere für die Weltraumnavigation von Bedeutung ist, zu liefern.

3. Entwicklung eines Fortführungskonzeptes für das RTW

Sobald beide Twin-Teleskope betriebsbereit sind, soll das 20m-Teleskop für dringend benötigte Spezialanwendungen eingesetzt werden. Eine dieser Anwendungen ist die Astrometrie zur Bestimmung von Positionen schwach strahlender Quasare. Diese kommen in der Regel dem Ideal von Punktquellen sehr nah, benötigen aber Teleskope mit größerem Durchmesser und vergleichsweise lange Integrationszeiten.

4. Beobachtung von GNSS Satelliten mit VLBI

Weitere Anwendungen, die für das 20m-Teleskop realisiert werden sollen, sind Messungen zur direkten Verknüpfung vom himmelfesten Referenzsystem mit dem dynamischen Referenzsystem der GNSS-Satellitenbahnen mittels Beobachtungen von GNSS-Satelliten mit Radioteleskopen, wobei differentielle Beobachtungen zu Quasaren die höchste Genauigkeit versprechen. Das Gleiche gilt auch für interplanetare Raumsonden oder Transponder auf dem Mond. Je nach ausgesendetem Frequenzband ist die Entwicklung eigenständiger Empfängertechnologie zu entwickeln, wie dies z.B. für das L-Band der GNSS-Satelliten erforderlich ist.

5. Nutzung des Arrays aus drei Radioteleskopen

Schließlich ist noch zu erwähnen, dass die Twin-Teleskope zusammen mit dem 20m-Teleskop ein lokales Antennen-Array bilden, das für vielerlei Spezialanwendungen genutzt werden soll. So können mit den drei Teleskopen lokale VLBI-Sessionen beobachtet werden, die wertvolle Daten für Turbulenz- und Refraktionsuntersuchungen liefern (siehe auch DFG-Projekt NO318/10-1). Außerdem sollen mit einem phasenstabilisierten Array auch niedrigfliegende Satelliten interferometrisch beobachtet werden, was zu einem weiteren Verbindungselement zwischen dem quasi-inertialen Bezugssystem der Radioquellen und den dynamischen Systemen der Satellitenbahnen führt.

Objective 3 Integrierte Nutzung der Daten des GREF-Stationsnetzes

Mit dem integrierten geodätischen Referenznetz Deutschlands (GREF) trägt das BKG zur Realisierung des einheitlichen Raumbezuges in Deutschland bei. GREF verbindet die GNSS-Netze der Bundesländer mit den übergeordneten europäischen und internationalen Referenznetzen. Die Stationen des GREF-Netzes wurden mit dem Ziel errichtet, höchsten Anforderungen hinsichtlich Stabilität der Monumente und Aktualität der genutzten Messtechnik zu genügen. Aufgrund der besonders soliden Vermarkung der Stationen in der Örtlichkeit sowie eines umfassenden Monitorings mit regelmäßig durchgeführten Überwachungsmessungen können die Stationen des GREF-Netzes quasi als Geosensoren für Erfassung möglicher rezenter Erdkrustenbewegungen angesehen werden und liefern damit einen Beitrag zum Umweltmonitoring in Deutschland.

1. Reprozessierung der Beobachtungszeitreihen nach einheitlichen Standards

Die Beobachtung der GREF-Stationen und die Auswertung der Daten erfolgt im operationellen Betrieb in enger zeitlicher Abfolge von wenigen Tagen mit einer zu diesem Zeitpunkt dem Stand der Technik entsprechenden Auswertestrategie. Technologische Weiterentwicklungen in der Auswertesoftware, der darin genutzten Modellbildungen und Berechnungsansätze (z.B. Modellierung der Satellitenbahnen, troposphärischen Laufzeitverzögerungen, Antennenphasenvariationen) sowie Aktualisierungen in den zugrunde liegenden geodätischen Referenzsystemrealisierungen führen zu Inkonsistenzen in den Parameterzeitreihen der operationellen Ergebnisse. Für Untersuchungen von kleinen Effekten über lange Zeiträume, wie z.B. säkulare Senkungen oder Hebungen der Erdkruste in Deutschland, sind homogene Koordinatenzeitreihen unverzichtbar. Die

Erstellung derartiger Zeitreihen setzt eine Reprozessierung aller Beobachtungen mit einer einheitlichen Auswertesoftware und nach einheitlichen Auswertestandards voraus. Für die europäischen und internationalen GNSS-Netze wurden derartige Reprozessierungen in der Vergangenheit erfolgreich durchgeführt.

Für die Reprozessierung von GNSS-Beobachtungen ist im BKG ein Prozessierungsschema zu erstellen und softwaremäßig umzusetzen. Grundlage bildet die sogenannte CVS-Version der Bernese GNSS Software, die den aktuellen Stand der Softwareentwicklung am Astronomischen Institut der Universität Bern widerspiegelt. Ziel dieser „Reprocessing-Engine“ ist es, bei Bedarf die Beobachtungen einer größeren Anzahl von GNSS-Stationen über einen längeren Zeitraum nach einheitlichen Standards prozessieren zu können und homogene Zeitreihen der unbekannten Parameter, wie z.B. Stationskoordinaten oder Laufzeitverzögerungen in der Troposphäre, ableiten zu können. Damit soll neben der operationellen Prozessierungskette ein Werkzeug geschaffen werden, das es erlaubt, systematische Untersuchungen in der GNSS-Analyse durchzuführen.

2. Erweiterung auf Multi-GNSS-Beobachtungen

Mit dem weiteren Ausbau der globalen Navigationssysteme steht eine Vielzahl neuer GNSS-Beobachtungen zur Verfügung. Die GREF-Stationen sind weiterhin zu ertüchtigen, die verfügbaren GNSS zu beobachten. Nachdem die Prozessierung von GPS und GLONASS-Beobachtungen standardmäßig erfolgt, ist ein besonderer Schwerpunkt auf die Integration von Galileo und BeiDou zu legen. Beide Systeme sind sowohl in die operationelle Prozessierungsstrategie als auch in die Reprozessierung einzubinden. Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit globaler Parameter für alle GNSS, wie z.B. präziser Satellitenbahnen des IGS.

3. Kombination mit Gravimetrie

Im Ergebnis der Reprozessierung stehen homogene Koordinatenzeitreihen aus GNSS-Beobachtungen zur Verfügung, die eine Beurteilung der geometrischen Stabilität des GREF-Netzes erlauben. Durch die Beobachtungsdauer von 10 und mehr Jahren für die meisten GREF Stationen kann erwartet werden, dass zuverlässige Aussagen über zeitliche Positionsänderungen auch für längerfristige und langsam ablaufende



Abbildung 3-4: GNSS-Antennen am Geodätischen Observatorium Wettzell

Prozesse getroffen werden können. Die Kombination dieser Ergebnisse mit weiteren geodätischen Beobachtungen lässt eine tiefer gehende Interpretation der Ursachen zu. Von besonderem Wert sind in diesem Zusammenhang die Resultate der im Rahmen der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) durchgeführten Wiederholungsmessung des deutschen Nivellementsnetzes. Alle GREF-Stationen wurden an das Nivellementsnetz angeschlossen. Die aus den Wiederholungsmessungen ableitbaren Höhenänderungen können mit den entsprechenden Ergebnissen der GNSS-Reprozessierung verglichen werden. Der Vergleich der unabhängig voneinander bestimmten Ergebnisse, die mit unterschiedlichen Messverfahren gewonnen wurden, ermöglicht nicht nur die Abschätzung von Zuverlässigkeit und Genauigkeit der verschiedenen Messverfahren, sondern auch die Bestimmung möglicher systematischer Fehler, ein Ergebnis das für die Wahl effizienter Messmethoden für präzise Vermessungen von unmittelbarer praktischer Bedeutung ist. Mit dem Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Messverfahren, insbesondere von geometrischen und gravimetrischen Messgrößen, wird die Untersuchung der Ursachen von Änderungen der Erdkruste angestrebt. Die Kenntnis der Ursachen und Wechselwirkungen ist eine unverzichtbare Voraussetzung für eine zuverlässige Prognose und Risikobewertung zukünftiger Veränderungen. Als Beispiel hierfür seien Höhenänderungen im Küstenbereich angeführt, die für die Bemessung von Deichen eine wichtige Ausgangsinformation darstellen. Sie werden sowohl durch die Änderungen der Höhe der Erdkruste als auch des Meeresspiegels beeinflusst, Prozesse, die sehr unterschiedliche Ursachen und einen unterschiedlichen zeitlichen Verlauf haben.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die langfristig angelegte Konzeption der Messungen an den GREF Stationen, insbesondere auch der absoluten Schwerebeobachtungen, zunehmend an Bedeutung. Langzeitvergleiche mit früheren Beobachtungsepochen des DHHN, die Kombination mit den Ergebnissen der GNSS-Auswertung und den absoluten Schwerebeobachtungen an den GREF-Stationen erlauben Rückschlüsse auf die geodynamische Situation in Deutschland. Da diese Effekte in Deutschland klein, längerfristig aber durchaus von sozioökonomischer Bedeutung sind, ist eine sorgfältige konsistente Auswertung aller beteiligten Beobachtungsverfahren und die kontinuierliche Weiterführung der Beobachtungen auf dem Stand der Wissenschaft und Technik eine zwingende Voraussetzung für ihre Detektion (s. auch Schwerpunkt 2, Objective 4).

Objective 4 Konsistente Verknüpfung der Messsysteme und Raumverfahren

Zur Realisierung des globalen Referenzrahmens tragen alle Raumverfahren bei. Die Verknüpfung der verschiedenen Techniken erfolgt über Ko-Lokationen an Fundamentalstationen wie dem Geodätischen Observatorium Wettzell. Die FGS strebt die Nutzung des gesamten Potenzials dieser Verknüpfungen an, um eine konsistente Kombination der Verfahren zu realisieren. Hierzu sollen auch neue Technologien und Ko-Lokationen auf Satelliten herangezogen, aber auch die Kombinationsmethodik weiterentwickelt werden. Dies setzt eine konsistente Modellierung sowie den Einsatz homogener Standards (siehe Schwerpunkt 3, Objective 3) voraus. Hieraus ergeben sich die folgenden Aufgaben.

1. Nutzung des vollständigen Potenzials der Ko-Lokationen am Boden

Bei der ITRF-Berechnung wurden zur Verknüpfung der Beobachtungsverfahren auf den Ko-Lokationsstationen bisher ausschließlich die Stationskoordinaten genutzt, unter Verwendung von lokalen terrestrischen Verbindungsvektoren (Local Ties) als Sollwerte der Koordinatendifferenzen zu einer bestimmten Epoche. Erkenntnisse aus der permanenten Überwachung der Verknüpfungsvektoren in Wettzell (siehe Schwerpunkt 3, Objective 1) müssen in adäquater Form bei der Kombination der

Raumverfahren berücksichtigt werden, insbesondere unter dem Aspekt der zeitlichen Änderung der Vektoren, die das Einführen eines Local Ties nur zu einer bestimmten Epoche nicht mehr erlaubt. Die Parameter zur Verknüpfung der Raumverfahren müssen auf andere stationsspezifische Parameter ausgeweitet werden, z.B. Uhren und troposphärische Laufzeitverzögerungen.

Bezüglich der Uhren wird in Wettzell in den nächsten Jahren die infrastrukturelle Grundlage geschaffen, dass alle Messsysteme mit einer einheitlichen Zeitbasis arbeiten (siehe Schwerpunkt 3, Objective 6), so dass dies auch gerechtfertigter Weise bei der Analyse als Vorgabe verwendet werden kann. Die Analysemethoden müssen diesbezüglich noch erweitert werden. Diese universale Zeitbasis aller Messsysteme erlaubt über die Schaffung eines gemeinsamen von allen Systemen nutzbaren geometrischen Referenzzieles einen geschlossenen Inter-Technik Ringvergleich aller Messverfahren in Raum und Zeit (Closure-Verfahren). Darüber hinaus erlauben Ko-Lokationsmessungen innerhalb der Techniken SLR und VLBI, sowie zwischen den Techniken VLBI, SLR und GNSS den gleichen geschlossenen Vergleich. Auch die Frage, ob für andere Stationen die gleiche Uhr mit den gleichen Uhrparametern für mehrere Beobachtungsverfahren verwendet werden kann, muss untersucht werden.

Auch die Troposphäre soll zukünftig bei der TRF-Berechnung als Verknüpfungselement zwischen den Beobachtungstechniken (v.a. Mikrowellenverfahren) verwendet werden. Die bisher übliche unabhängige Schätzung von Laufzeitverzögerungen (Zenitrichtung und horizontale Gradienten) für GNSS und VLBI soll umgestellt werden auf eine gemeinsame Schätzung. Dass dies möglich ist und für die Referenzrahmenberechnung (insbesondere bei Epochenreferenzrahmen) eine Stabilisierung bedeutet, wurde bereits gezeigt. Die Methoden müssen aber noch hinsichtlich des Höhenunterschiedes zwischen den Referenzpunkten optimiert werden und für die finale Produkterzeugung eingesetzt werden (siehe Schwerpunkt 2, Objective 6). Die Frage, inwieweit optische Messungen (SLR) ebenfalls mit einbezogen werden können, soll ebenfalls untersucht werden.

2. Nutzung der Ko-Lokationen im Weltraum

Die bisherige Berechnung des ITRF stützt sich ausschließlich auf Ko-Lokationen auf Stationsebene obwohl schon jetzt zahlreiche Satelliten eine Ko-Lokation für GNSS- und SLR-Beobachtungen bieten, z.B. alle GLONASS-Satelliten oder diverse tieffliegende Satelliten, die sowohl einen GPS-Empfänger an Bord tragen als auch von SLR-Stationen angemessen werden. Die Einbeziehung dieser Daten in die Berechnung eines Langzeit-Referenzrahmens (z.B. ITRF) muss untersucht werden. Außerdem muss analysiert werden, inwieweit Epochenreferenzrahmen durch Verwendung von Ko-Lokationen auf Satelliten verbessert werden können. Insbesondere die Einbindung der bereits langen Zeitspanne an SLR-Beobachtungen zu GPS- und GLONASS-Satelliten sollte eingehend untersucht werden. Die Einbindung von tieffliegenden Satelliten eröffnet außerdem die Möglichkeit, eine bessere Verknüpfung der geometrischen Verfahren GNSS und SLR mit dem Schwerfeld zu erreichen (siehe auch Punkt 3). Untersucht werden sollen auch Konzepte, welche auf präzisen Zwischensatelliten-Distanzmessungen beruhen, wie sie in der ESA-Studie GETRIS vorgeschlagen wurden.

Eine Möglichkeit zur Ko-Lokation im Weltraum mit VLBI ist die Beobachtung von GNSS-Satelliten mit Radioteleskopen. Geschieht dies mit eingebetteten Quasarbeobachtungen, so kann eine direkte Verbindung zwischen den Satellitenbahnen und dem himmelfesten Referenzsystem realisiert werden. Zwei Arbeitsschwerpunkte sind hier zu nennen. Die Korrelation von VLBI-Beobachtungen bewegter Ziele (=Satelliten) muss noch

für eine routinemäßige Prozessierung größerer Beobachtungsmengen entwickelt werden. Dabei sind die Umsetzung von a priori Bahnparametern in entsprechende Funktionen und die effiziente Buchführung für die Berechnung der jeweiligen Gesamtlaufzeitdifferenz elementare neue Bestandteile des vollständigen Korrelationsprozesses. Der zweite Schwerpunkt ist die Behandlung der Bahnparameter in der Auswertung. Neben den neuen, nicht standardmäßig eingesetzten Parametern stellt die Möglichkeit der Nutzung von sog. phase-referencing Beobachtungen sowohl eine Herausforderung als auch eine Möglichkeit für weitere Entwicklungen dar.

3. *Kombinierte Analyse der GNSS-, SLR- und VLBI-Daten und Verknüpfung zum globalen Schwerefeld*

Durch eine verbesserte Kombination der satellitengestützten Raumbeobachtungsverfahren sowohl auf Ebene der Stationen wie auch auf Ebene der Satellitenbahnen soll die Genauigkeit der Datumsrealisierung (Koordinatenursprung, Maßstab und Orientierung) gesteigert werden. Zudem soll mit Hilfe von Simulationen ermittelt werden, durch welche Satellitenkonfigurationen die Genauigkeit weiter gesteigert werden kann. Eine zentrale Frage ist zudem, ob auch eine dynamische Realisierung der Orientierung durch Fixieren entsprechender Koeffizienten des Erdschwerefeldes mit ausreichend hoher Genauigkeit erfolgen kann.

Geht man noch einen Schritt weiter, so ist die Frage der konsistenten Bestimmung aller drei Säulen der Geodäsie, Form/Geometrie, Erdorientierung sowie das Schwerefeld, ein wichtiges Forschungsthema der nächsten Jahre. Insbesondere die letztgenannte Komponente wurde bisher unabhängig von den beiden anderen Komponenten berechnet obwohl für alle drei Komponenten Satellitenmessverfahren eingesetzt werden. Die „klassischen“ Satelliten zur Bestimmung von Geometrie und Erdorientierung (GNSS und SLR-Kugelsatelliten) können insbesondere zu den niederen Termen des Erdschwerefeldes beitragen. Dieser Ansatz soll in den nächsten Jahren im Rahmen des FGS-Forschungsprogramms verstärkt verfolgt und die sich daraus ergebende Verbesserung des Referenzrahmens sowie der Konsistenz zwischen Geometrie, Orientierung und Schwere untersucht werden.

4. *Kombinierte Analyse zur Bestimmung konsistenter CRF + TRF + EOP*

Der himmelsfeste Referenzrahmen (CRF) der Quasare und anderer kompakter Radioquellen wird zurzeit noch repräsentiert vom sog. ICRF-2. Eine Überarbeitung unter Verwendung des neuen VLBI-Beobachtungsmaterials, sowie eine CRF-Berechnung als Kombinationslösung verschiedener Beobachtungsfrequenzen und Auswertungen mehrerer Zentren ist die Aufgabe der nächsten Jahre. Dazu müssen die Radioquellen auf ihre Stabilität und die Charakteristik ihres Positionsverhaltens untersucht werden, um daraus Rückschlüsse auf eine mögliche nicht-lineare Bewegung ziehen und eine geeignete Parametrisierung entwickeln zu können. Bei der Kombination verschiedener Lösungen unterschiedlicher Beobachtungsfrequenzen können quellen-inhärente Exzentrizitäten (sog. Core shifts) auftreten, die es noch zu untersuchen gilt. Außerdem besteht noch Forschungsbedarf zu der Frage, wie aus reinen CRF-Lösungen, für die nur Varianz-Kovarianz-Matrizen vorliegen, in optimaler Weise datumsfreie Normalgleichungen für die Kombination erzeugt werden können.

Der terrestrische und der himmelsbezogene Referenzrahmen (TRF, CRF) werden derzeit noch weitestgehend unabhängig voneinander berechnet, wodurch Inkonsistenzen zwischen den Referenzrahmen und den jeweils koparametrisierten EOP-Reihen entstehen. Die IUGG-Resolution No.3 von 2011 fordert allerdings eine hohe Konsistenz zwischen dem himmelsfesten Referenzrahmen (CRF), dem TRF und den EOPs. Zur

Verbesserung der Konsistenz der Produkte ist die gemeinsame Schätzung von TRF, CRF und EOPs ein wichtiger Schritt. Erste Arbeiten dazu wurden bereits in der FGS durchgeführt. Forschungsbedarf besteht bezüglich der optimalen Gewichtung der Verfahren und des Effektes der Kombination der EOPs auf den ICRF.

Eine weitere Möglichkeit der Verbesserung der Konsistenz der Referenzsysteme ist die Beobachtung von GNSS mit Radioteleskopen, wie Objective 2 bereits erwähnt.

5. Entwicklung neuer Konzepte zur Handhabung nicht-linearer Stationsbewegungen

Die verbesserte Behandlung nicht-linearer Stationsbewegungen bei der ITRF-Berechnung ist eine wichtige Aufgabe der kommenden Jahre und ein wesentlicher Gegenstand des Projektes PN 5 der DFG Forschergruppe „Referenzsysteme“ (FOR 1503). Es werden die drei folgenden Ansätze verfolgt:

- (1) Erfassung der saisonalen Stationsbewegungen durch verfeinerte geophysikalische Modelle (z.B. infolge atmosphärischer, ozeanischer oder hydrologischer Auflastdeformationen).
- (2) Erweiterung der Parametrisierung mit nicht-linearen Funktionen (z.B. harmonische Funktionen für saisonale Signale).
- (3) Schätzung von Epochenreferenzrahmen (z.B. wöchentlich oder 14-tägig).

Erste Ergebnisse sind in Abbildung 3-5 für die GNSS Station Zwenigorod dargestellt.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Ansätze müssen verglichen und im Detail studiert werden. Bei der Schätzung der saisonalen Signale ist die Signifikanz der Ergebnisse zu untersuchen.

Hinsichtlich der geophysikalischen Modelle muss einerseits untersucht werden, inwieweit Unterschiede in den verfügbaren Modellen die Referenzrahmenberechnung beeinflussen, und andererseits welche Rolle die Konsistenz zwischen Modellen für die Geometrie (Auflastdeformation) und für Schwerfeldänderungen spielt. Die Verwendung von regionalen bzw. lokalen Modellen (z.B. hinsichtlich Grundwasser) sollte ebenfalls untersucht werden.

Die Zeitreihe aus Epochenreferenzrahmen liefert zeitlich hochaufgelöste Stationspositionen mit hoher absoluter Genauigkeit. Die zentralen Themen hierbei sind die Verbesserung der Kombination der Verfahren und der Stabilität des geodätischen Datums.

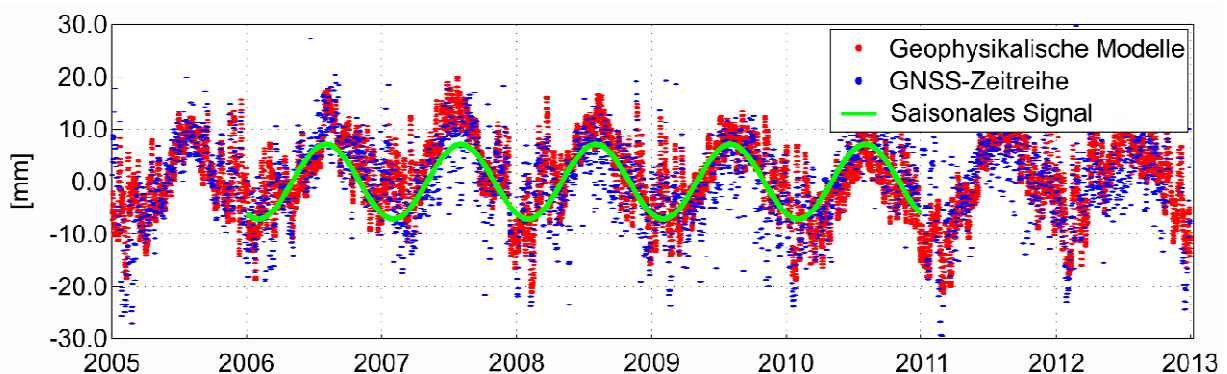


Abbildung 3-5: Zeitreihe der Höhenkomponente der GNSS-Station Zwenigorod, Russland (blau) im Vergleich zu einer Zeitreihe von Auflastdeformationen aus geophysikalischen Modellen (rot) und einem aus den Beobachtungsdaten geschätzten saisonalen Signal (grün)

Objective 5 Konsistente Realisierung eines integrierten Raumbezuges

Durch die Fortschritte in den letzten 10 Jahren, die sowohl im Bereich der GNSS-Technologie und darauf aufbauender Positionierungsdienste als auch auf dem Gebiet der globalen Schwerefeldbestimmung infolge der Satellitenschwerefeldmissionen erreicht wurden, gewinnen die GNSS-gestützten Verfahren in Kombination mit Geoid- bzw. Quasigeoidmodellen zunehmend an Bedeutung für die Höhenbestimmung. Insbesondere in Meeresbereichen eröffnet diese Methodik neue messtechnische Möglichkeiten, die vor dem Hintergrund der Energiewende und dem Ausbau der Windenergie sowie der immer intensiveren Nutzung der Meeresgebiete von unmittelbarer praktischer Bedeutung sind. Außerdem entsteht damit im kontinentalen Bereich eine Alternative zu den zeit- und kostenintensiven Nivellements, die bislang das grundlegende Messverfahren für die präzise Höhenbestimmung sind. Heute ist die GNSS-gestützte Höhenbestimmung jedoch noch auf Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsanforderungen begrenzt. Die Höhensysteme der Landesvermessung werden beinahe ausnahmslos noch immer auf der Grundlage von Nivellementsnetzen realisiert. Aber auch hier werden GNSS-Verfahren in Kombination mit einem Geoid- bzw. Quasigeoidmodell zunehmend für die Überprüfung und den Ersatz von Nivellementsnetzen 3. und 4. Ordnung genutzt.

1. Geoidmodellierung

Die Erweiterung der Anwendungsbereiche der GNSS-gestützten Höhenbestimmung setzt eine konsequente Umsetzung des integrierten Raumbezuges voraus. Nur durch eine konsistente Kombination der geometrischen und schwerefeldbezogenen Meßgrößen können Geoid- bzw. Quasigeoidmodelle mit der notwendigen Genauigkeit bestimmt und so die notwendige Grundlage für eine operative zentimetergenaue GNSS-basierte Höhenbestimmung gelegt werden. Die Satellitenschwerefeldmissionen der letzten 15 Jahre haben die Grundlage für präzise globale Schwerefeldmodelle im langwelligen Bereich gelegt. Für die Erfassung der höherfrequenten Variationen, die Unsicherheiten von mehreren Dezimetern bewirken können, sind nach wie vor terrestrische Schweremessungen und digitale Höhenmodelle unverzichtbar. Die Anforderungen, die an die Schwerewerte für die Geoidmodellierung gestellt werden, verdeutlichen die Notwendigkeit eines integrierten Raumbezuges. Schwerewerte für die Geoidmodellierung müssen nicht nur hinreichend aktuell und genau sein sowie in ausreichender Dichte vorliegen. Eine wichtige Voraussetzung für die Bestimmung von Geoid- bzw. Quasigeoidmodellen mit Zentimeter- und Subzentimetergenauigkeit ist der Bezug aller Schwerewerte auf ein mit Hilfe der Absolutgravimetrie bestimmtes einheitliches und global vergleichbares Niveau sowie eine zuverlässige und genaue räumliche Zuordnung der Messwerte, d.h. die Bestimmung der dreidimensionalen Position mit Hilfe von GNSS Messungen in einem klar definierten globalen Bezugssystem. Alle Eingangsdaten für die Geoidbestimmung, d.h. globale Schwerefeldmodelle, gravimetrische Schwerewerte, digitale Höhenmodelle und Höhenanomalien an GNSS-/Nivellementspunkten, müssen sich auf einheitliche Standards sowie konsistente Referenzsysteme und -rahmen für die Schwere, die Höhe und die Position beziehen und entsprechend ihrer Fehlercharakteristik kombiniert werden. Eine nachträgliche Parametrisierung von Fehlern in den verschiedenen Datensätzen ist mit erheblichen praktischen Problemen verbunden, schwächt die Auswertung und beeinträchtigt so die erreichbare Genauigkeit der Geoid- und Quasigeoidmodelle.

2. Kombination von Schwerefeldbeobachtungen aus Schwerefeldmissionen mit terrestrischen Schweremessungen

Die stringente Kombination von satellitengestützten Schwerefeldbeobachtungen (wie sie in den Satellitenschwerefeldmissionen von GOCE,

GRACE und CHAMP gewonnen wurden) mit terrestrischen Schwere-messungen bzw. anderen Beobachtungsfunktionalen, die Schwerefeldinformationen enthalten, ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt, s. auch Schwerpunkt 2, Objective 4. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Kreuz-Validierung unterschiedlicher Datentypen, wie z. B. Satelliten- und terrestrischen Daten im überlappenden Bereich des Spektrums. Insbesondere mit den Schwerefeldmodellen der GOCE-Mission wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Datengüte terrestrischer und flugzeugbasierter Beobachtungen unabhängig zu validieren, bestehende Systematiken in terrestrischen Datenbasen zu identifizieren und diese in eine konsistente globale Lösung einzupflegen. Von besonderer Bedeutung ist im Zuge der Kombination die korrekte Beschreibung der Stochastik aller Beobachtungstypen, da sich daraus je nach Datengüte regional unterschiedliche relative Gewichte ergeben. Um diese vollständig in die Genauigkeitsbeschreibung des kombinierten Modells fortpflanzen zu können, ist die Anwendung voller Normalgleichungen auch für sehr große Systeme unerlässlich.

3. Terrestrische Schwerefeldbestimmung

Die terrestrische Schwerefeldbestimmung steht in engem Zusammenhang mit den Schwerpunktthemen „GGOS“ und „Etablierung und Implementierung von Standards“. Die gravimetrischen Messmethoden ermöglichen die Erfassung von zeitvariablen Schwerefeldänderungen als Wirkungen von Massentransporten, um Aussagen zu Veränderungen im System Erde als Folge des globalen Klimawandels zu erlangen. Im globalen Maßstab werden diese Prozesse in den Satellitenschwerefeldmissionen sichtbar, die jedoch hochgenaue terrestrische Messungen, insbesondere bei der Untersuchung lokaler Phänomene, nicht ersetzen können. Hier wird das BKG auch zukünftig einen wichtigen Beitrag durch den Betrieb terrestrischer Schwerestationen zur metrologischen Sicherstellung des Schwerestands für Deutschland leisten. Durch die Einbeziehung innovativer Entwicklungen in der Sensortechnik (Atominterferometrie) und die intensive Kooperation mit Forschungseinrichtungen (GFZ, KEG, IfE) wird das Potential dieser Messungen ausgeschöpft (s. Schwerpunkt 3, Objective 9).



Abbildung 3-6: Terrestrische Schweremessungen mit dem Absolutgravimeter A10 im August 2014 am Vernagtferner in Österreich

Objective 6 Nutzung neuer Messsysteme und Beobachtungstechniken

Zur konsistenten und präzisen Realisierung des globalen terrestrischen Referenzsystems sollen auch neue Messsysteme und Beobachtungstechniken zum Einsatz kommen. Geplant sind die folgenden Untersuchungen und Entwicklungen.

1. Nutzung von Multi-GNSS-Beobachtungen

Zur Realisierung des ITRF werden heute GPS und GLONASS Beobachtungen verwendet. Bereits sind 8 Galileo Satelliten und 15 BeiDou Satelliten verfügbar und senden Navigationssignale. Im Rahmen des IGS Multi-GNSS Experiments (MGEX) wurde auch unter Beteiligung der FGS ein Trackingnetz von Multi-GNSS-Empfängern aufgebaut, welches heute über 120 Stationen umfasst. Daten von Galileo und QZSS werden an der TUM bereits routinemäßig analysiert. Fragestellungen, die zu bearbeiten sind, betreffen die Strahlungsdruckmodellierung für die neuen Satelliten, die Charakterisierung der Stabilität der Uhren an Bord der Satelliten, die Bestimmung der verschiedenen Biases zwischen den Signalen, Frequenzen und Satellitensystemen mit dem Ziel einer konsistenten kombinierten Nutzung aller neuen Satellitensysteme.

2. Nutzung neuer Beobachtungstypen der Satellitenverfahren

Zukünftige GNSS Satellitensysteme werden voraussichtlich mit der Möglichkeit zur präzisen Zwischensatelliten-Distanzmessung ausgestattet. Der Einfluss solcher neuartiger Beobachtungstypen auf die Stabilität der Bahnkonstellation und das terrestrische Referenzsystem soll detailliert untersucht werden. GNSS Satelliten werden mit immer stabileren Oszillatoren ausgestattet. Untersuchungen zur Nutzung der Stabilität der Uhren in der Datenanalyse sollen weitergeführt werden. Die neue Generation von DORIS-Empfängern erlaubt die Registrierung von Phasenbeobachtungen, welche in Form von RINEX-Files verfügbar gemacht werden. Zur Nutzung der Phase müssen die Uhren von Satelliten und DORIS-Sendern im ps-Bereich synchronisiert werden. Dies ist möglich, wenn DORIS-Beobachtungen mit Beobachtungen von GNSS-Empfängern an den DORIS-Stationen kombiniert verarbeitet werden. Im Rahmen eines DFG-Projektes (HU 1558/7-1) wird der Einfluss dieses neuartigen Analyseverfahrens auf die Stabilität der DORIS-Stationskoordinaten untersucht.

3. Nutzung der Polarisation in der SLR-Entfernungsmessung

Im Rahmen von GGOS wird bei SLR eine absolute Genauigkeit von 1mm angestrebt. Neben Refraktionseinflüssen ist die Massenzentrumskorrektur der Satellitenreflektoranordnungen im Allgemeinen der größte verbleibende systematische Unsicherheitsfaktor. Aufgrund der Polarisationsabhängigkeit der Reflexion können Antwortfunktionen für linear- und zirkular polarisiertes Licht aus den Entfernungsmessungen experimentell bestimmt und zur Validierung von Modellen der Massenzentrumskorrektur verwendet werden.

Objective 7 Einbindung des G-Ringlasers in die Bestimmung von Erdrotationsparametern

Der Großringlaser „G“ ist ein einzigartiges Instrument, welches als Inertialsensor die Rotation der Erde direkt in Bezug auf das lokale Inertialsystem messen kann. In den vergangenen Jahren konnte sowohl das Auflösungsvermögen, wie auch die Stabilität der Ringlasermessungen erheblich gesteigert werden. Die Stabilisierung des Skalenfaktors auf der einen Seite und die Korrektur des Einflusses der Rückstreuungskopplung andererseits haben zu einem Zustand geführt, bei dem die Messungen des G-Ringlasers nicht mehr durch die Sensoreigenschaften, sondern durch die Hilfssensorik begrenzt sind (Orientierungsmodell). Abbildung 3-7 zeigt eine gemessene Zeitreihe (Sept. – Dez. 2014) des G Ringlasers in Wett-

zell nach Reduktion der Erdgezeiten, der täglichen Polbewegung, der Variation des Breitengrades, der lokalen Neigung, der jährlichen und der Chandlerbewegung des Pols. Die Ringlasermessungen wurden bezüglich der Rückstreuungseinflüsse der Laserkomponente korrigiert (Hurst et al. 2014). Ferner wurde der Linearanteil der Tiltmeterdrift aus der Messreihe reduziert. Da die Korrektur bei den unterschiedlichen kollozierten Tiltmetern zu signifikant verschiedenen Verläufen der Residuen führt, wird die Auflösung der Ringlasermessungen am G auch durch die Neigungskorrektur begrenzt.

Ziel ist, mit zusätzlichen Maßnahmen die Stabilität des Ringlasers weiter zu steigern. Die Messdaten sollen in die Kombination der klassischen Raumverfahren zur Bestimmung der Erdrotationsparameter eingebunden werden. Dies erfordert die folgenden Maßnahmen.

1. Optimierung der lokalen Korrekturmodelle

Neigungen des G-Ringlasers in Nord-Südrichtung ändern die Projektion des Normalenvektors auf die Erdrotationsachse und damit den gemessenen Anteil des Rotationsvektors. Insbesondere durch die oberflächennahe Installation des G-Ringlasers machen sich thermoelastische Deformationen und hydrologische Einflüsse durch Neigungsänderungen bemerkbar. Die zu diesem Zwecke verwendeten Neigungsmesser verfügen über ein ausreichendes Auflösungsvermögen, um diese Neigungen zu bestimmen und die Orientierungsänderungen zu korrigieren. Im Kurzzeitbereich haben sich diese Korrekturen als sehr wirksam erwiesen. Jedoch im Langzeitbereich zeigen die Neigungsmesser ein nicht zu vernachlässigendes Driftverhalten. Zur Verbesserung der Stabilität der Rotationsmessdaten muss daher das Sensormodell dieser Zusatzsensorik verbessert werden.

2. Beteiligung am Aufbau weiterer Ringlaser

Aufgrund der Einschränkung durch die Hilfssensorik kann ein Fortschritt für die inertielle Rotationsmesstechnik insbesondere durch die Konstruktion eines redundant ausgelegten 3D-Sagnacsensors erzielt werden. Im Rahmen des ERC geförderten ROMY-Projekts an der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) entsteht in enger Kooperation mit der FGS in den nächsten Jahren so ein Mehrkomponentensystem am Geophysikalischen Observatorium der LMU in Fürstenfeldbruck. Die Korrelation der Messdaten mit jenen des G-Ringlasers wird die Trennung von lokalen und regionalen/globalen Effekten erlauben.

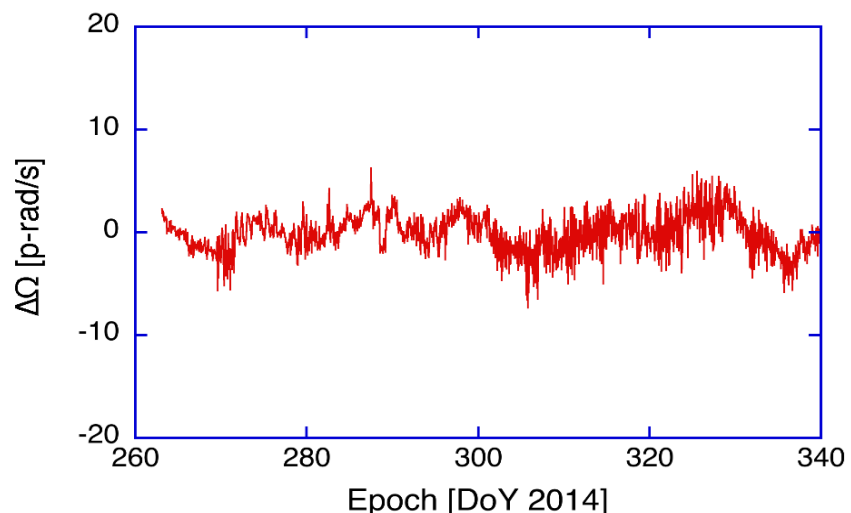


Abbildung 3-7: Zeitreihe der mit dem Ringlaser und seiner Zusatzsensorik gemessenen Erddrehrate nach Reduktion der geophysikalischen Einflüsse.

Der zweite Nachteil des G-Ringlaserlabors ist die oberflächennahe Platzierung, so dass hydrologische Einflüsse und thermoelastische Effekte die gemessenen Zeitreihen kontaminieren können. Durch die Installation eines Ringlasers im italienischen Gran-Sasso Tiefenlabor (GINGER Projekt) lassen sich diese Oberflächeneffekte substantiell reduzieren. Dieses Projekt wird gemeinsam mit dem INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) und der Universität Pisa verfolgt.

3. Erzeugung langer und ungestörter Ringlaser-Messzeitreihen

Nach der Verbesserung der Stabilität der Zusatzsensorik wird eine Ausdehnung der Messreihen von derzeit maximal 180 Tagen auf größere Zeiträume mit ungestörtem Betrieb angestrebt.

4. Kombination der Ringlaserdaten mit VLBI- und GNSS-Daten

Im Rahmen des derzeit laufenden DFG Forschungsvorhaben SCHR 645/6-1 entsteht ein Analyseprogramm, welches nach Korrektur der geophysikalischen Einflüsse auf das Ringlasersensorsignal die resultierenden Erdrotationsparameter im SINEX-Format ausgeben kann. Dies ermöglicht die Kombination der Ringlasermessungen mit VLBI- und GNSS-Messungen auf Normalgleichungsebene. Diese Möglichkeit soll genutzt werden, um den Beitrag der Inertialmessungen zu VLBI- und GNSS-Messungen zu untersuchen und zu quantifizieren. Insbesondere im Kurzzeitbereich ist eine Verbesserung der Modellierung aufgrund der zeitlich hoch aufgelösten Ringlasermessungen zu erwarten. Weiter soll untersucht werden, inwieweit Ringlaserdaten zur Bestimmung von subtäglichen Erdrotationsparametern genutzt werden können.

Objective 8 Konsistente Integration und konsequente Nutzung von Zeit und Frequenz in den Weltraumverfahren

Zeit und Frequenz spielen in den geodätischen Weltraumverfahren eine zentrale Rolle. Die verschiedenen Verfahren nutzen unterschiedliche Strategien, um mit der Tatsache umzugehen, dass alle Uhren im Messsystem synchronisiert werden müssen. Bei GNSS werden heute bei-

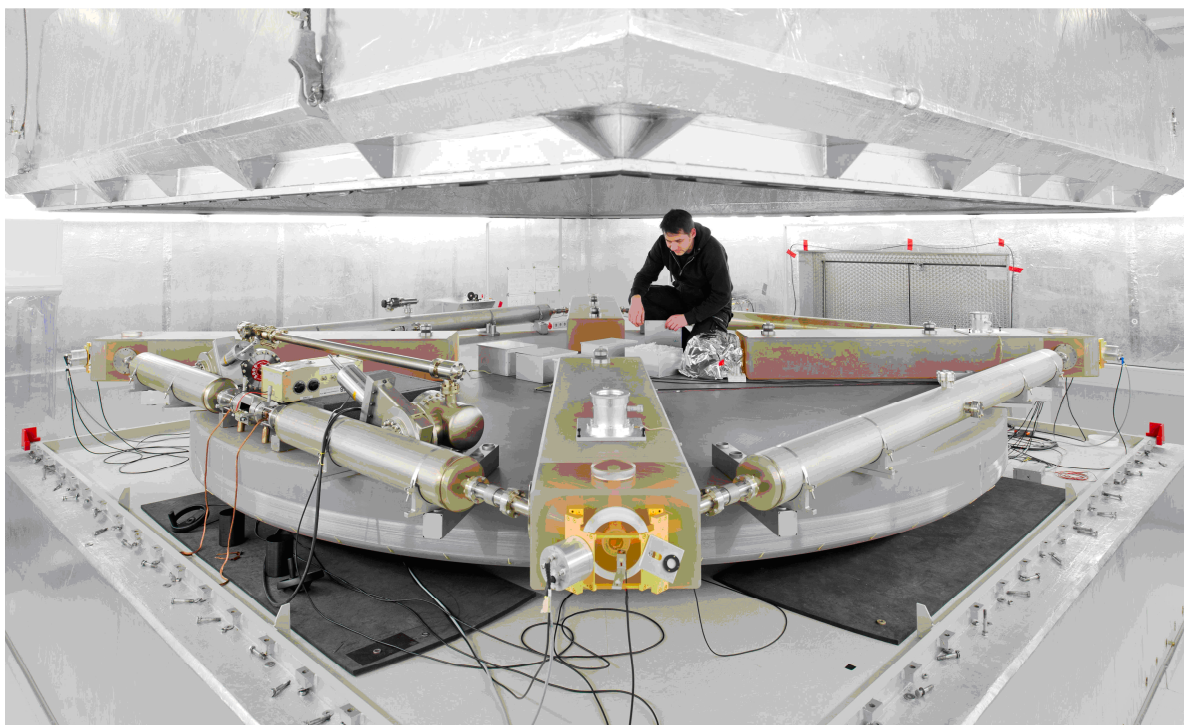


Abbildung 3-8: Grossringlaser „G“ am Geodätischen Observatorium Wettzell.

spielsweise alle Uhrenkorrekturen epochenweise geschätzt, während VLBI stabile Wasserstoffmaser nutzt. Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, Zeit und Frequenz gemeinsam mit einem zentralen für alle Weltraumverfahren gleichermaßen nutzbaren Referenzpunkt konsistent für alle Weltraumverfahren am Observatorium zu integrieren und gemeinsam zu nutzen. Das Potenzial der Kombination von Zeit und Frequenz an den geodätischen Observatorien zur Steigerung der Genauigkeit des Referenzrahmens soll untersucht und ausgeschöpft werden. Das Aufkommen ultrastabiler Uhren ergibt neue Möglichkeiten, die die Entwicklung von Konzepten zu deren Nutzung im Rahmen einer relativistischen Geodäsie erforderlich machen. Die Nutzung einer einheitlichen Zeit- und Frequenzbasis am Observatorium ist untrennbar verknüpft mit deren Realisierung, die als Aufgabe im Schwerpunkt 3 „Infrastruktur“ (Objective 6) formuliert ist.

1. *Nutzung der Zeit als gemeinsamer Parameter zur lokalen Verknüpfung der Messsysteme*

Ist eine präzise einheitliche Zeitbasis an allen Messsystemen des Geodätischen Observatoriums verfügbar, so können gemeinsame Uhrenparameter für alle Systeme geschätzt werden. Dies erlaubt, Verknüpfungen der Messsysteme nicht nur über geometrische Verbindungsvektoren und gemeinsame Atmosphäre, sondern auch über die gemeinsame Uhr zu realisieren. Erforderlich ist, die Software-Tools konsequent für die Kombination aller Raumverfahren auf Beobachtungsstufe weiterzuentwickeln, geschätzte Uhrenparameter der verschiedenen Systeme detailliert zu vergleichen und das Potential der Nutzung der gemeinsamen Zeitbasis mit Simulationen und Echtdateien abzuschätzen.

2. *Reduktion der systembedingten systematischen Fehler der einzelnen Messtechniken*

Die große Anzahl heute in der Datenanalyse geschätzten Uhrenparameter erlauben ein Verstecken technikspezifischer systematischer Fehler. Bei GNSS können die Uhrenparameter beispielsweise Troposphärenmodellierungsprobleme oder Antenneneffekte absorbieren. Die durch die Integration des neuen Zeitsystems ermöglichte Kombination der Uhrenparameter der Systeme in der Analyse und die Nutzung stabiler Oszillatoren ermöglicht die Offenlegung, Analyse, Modellierung und aktive Kompensation solcher Fehler. Detaillierte Untersuchungen sind für den Vergleich GNSS und VLBI vorgesehen.

3. *Nutzung der hochstabilen optischen Resonatoren für die VLBI*

Die Länge der Korrelationsintervalle bei VLBI wird u.a. beschränkt durch die Stabilität der an den Observatorien verwendeten Oszillatoren. Die Nutzung hochstabiler optischer Resonatoren anstelle von Wasserstoffmasern sollte die Verwendung längerer Korrelationsintervalle erlauben, womit das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis verbessert würde. Dies ist wichtig für die in VGOS vorgesehene Verkürzung der Beobachtungszeit pro Quasar. Mithilfe der Radioteleskope in Wettzell – vom selben oder von verschiedenen H-Masern gesteuert – kann das Konzept experimentell überprüft werden. Mittels optischer Resonatoren soll das Konzept nach Möglichkeit mit einem Partnerteleskop auf einer langen Basislinie näher untersucht werden.

4. *Entwicklung von Konzepten zur relativistischen Geodäsie*

Mittelfristig müssen Konzepte entwickelt werden, um zukünftig die Zeit als geodätische Beobachtungsgröße im relativistischen Sinne zu nutzen. Mit dem Aufkommen ultrastabiler Uhren wird die Zeithaltung auf der deformierbaren Erdkruste zu einer geodätischen Aufgabe. Untersucht werden muss auch die Frage, welche relativistischen Effekte in einem loka-

len stationsfesten Bezugssystem in Zukunft berücksichtigt werden müssen. Zur Diskussion entsprechender Fragen wird eine enge Zusammenarbeit mit dem SFB 1128 geo-Q in Hannover angestrebt.

Schwerpunkt 2 Monitoring geophysikalischer Prozesse

Ziele

- **Monitoring der lokalen Umgebung**

Auf dem Geodätischen Observatorium Wettzell sind die Messsysteme der geodätischen Raumverfahren auf engem Raum kolloziert – dies ist das Wesensmerkmal einer geodätischen Fundamentalstation. Lokale Umgebungseffekte müssen aus verschiedenen Gründen fortlaufend erfasst und analysiert werden. So wird über die Analyse der Daten des bereits eingerichteten GNSS Footprint-Netzwerks um die Station Wettzell der Nachweis erbracht, dass die lokal auf dem Observatorium gewonnenen Daten auch tatsächlich regional repräsentativ sind, also keine Deformationseffekte zu Fehlschlüssen bei der Interpretation der lokal gewonnenen Messungen führen können. Die hier bislang genutzten Techniken sollen durch weitere Verfahren ergänzt werden. Ebenso wird nunmehr eine integrierte geodätische Betrachtungsweise in den Vordergrund gerückt, die gravimetrische und geometrische Überwachungsmethoden koppelt.

Daneben stellt die Atmosphäre bzw. die hierdurch verursachte Refraktion nach wie vor den wesentlichen limitierenden Faktor bei der Genauigkeit sämtlicher Mikrowellen-Verfahren dar. Zur Verbesserung der Verfahren müssen atmosphärische Zustandsgrößen umfänglicher und regelmäßiger als bisher erfasst werden, was ebenfalls starke Infrastruktur-Anteile enthält. Neben der geodätischen Nutzung ist die langfristige Anwendung zur begleitenden Erfassung des Phänomens Klimawandel anzudenken. Hierbei handelt es sich um einen - auch von der Politik klar erkannten – Treiber, dem die Geodäsie nicht nur durch Messungen mit geodätischen Verfahren, sondern auch ergänzender Sensorik auf dem Observatorium und in seiner Umgebung Rechnung tragen kann.

Schlussendlich ist evident, dass Atmosphären- und Hydrologie-Modelle zur Reduktion geodätischer Messverfahren wie der Gravimetrie von hoher Bedeutung sind und an deren weiterer Verbesserung zu arbeiten ist. Hierdurch wird deutlich, dass ein wesentliches Ziel bei der Erfassung und Modellierung lokaler Effekte stets die Verbesserung der Messsysteme bzw. der damit erzielbaren Genauigkeiten darstellt.

- **Quantifizierung geophysikalischer Phänomene im Erdsystem**

Die modernen geodätischen Beobachtungsverfahren erfassen kontinuierlich und mit hoher Genauigkeit die Oberflächengeometrie, das Schwerfeld und die Rotation der Erde einschließlich ihrer Orientierung im Welt-raum sowie weitere physikalische Parameter des Erdsystems, beispielsweise der Atmosphäre. Aus geometrischen und gravimetrischen Raumbeobachtungen werden dabei wesentliche und alleinstellende integrale und globale Informationen über das System Erde gewonnen. Terrestrische Messverfahren liefern hingegen regionale oder lokale Informationen mit üblicherweise hoher räumlicher und/oder zeitlicher Auflösung. Zur Modellierung dynamischer Prozesse innerhalb einzelner und zwischen verschiedenen Erdsystemkomponenten sowie zur Interpretation von Veränderungsprozessen werden daher geeignete Verfahren zur Analyse der einzelnen Zeitreihen sowie zur Kombination der verschiedenen Datensätze auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen benötigt.

Die (geo)physikalische Modellierung und Interpretation der geodätischen Zeitreihen stellt eine anspruchsvolle und interdisziplinäre Aufgabe dar, die nur durch eine enge Kooperation mit Geophysikern und Geologen, Glaziologen, Ozeanographen, Hydrographen und Atmosphärenphysikern gelingen kann. Die FGS arbeitet bereits seit längerer Zeit in verschiede-

nen Projekten eng mit Erdwissenschaftlern zusammen. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit soll weiter ausgedehnt werden.

Zur Erreichung dieser Ziele sind für den Programmzeitraum von 2016 bis 2020 eine Reihe von Vorgaben zu erfüllen und entsprechende Detailaufgaben zu bearbeiten.

Objective 1 Verbesserte Erfassung und Modellierung der atmosphärischen Zustandsgrößen über Wettzell

Troposphärische Laufzeitverzögerungen stellen einen der wesentlichen Einflussfaktoren dar, welche die Genauigkeit der geodätischen Raumverfahren beschränken, was eine verbesserte Modellierung der Zustandsgrößen der Atmosphäre über Wettzell erforderlich macht. Andererseits können die verschiedenen Messinstrumente als Atmosphärensensor genutzt werden. Der in Abbildung 3-9 dargestellte regional stark variierende Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, abgeleitet aus einem Wettermodell, verdeutlicht das Erfordernis einer verbesserten Erfassung und Modellierung atmosphärischer Parameter.

1. WATSON: Wettzell Atmospheric State Model for the Neutral Atmosphere

Eine verbesserte Erfassung und Modellierung der atmosphärischen Zustandsgrößen über Wettzell wird durch Kombination von Infrastruktur-Maßnahmen (siehe hierzu Objective 9 im Schwerpunkt 3 „Infrastruktur“) und Modellierung angestrebt. Neben der zielgerichteten Einbindung von über geodätische Messverfahren gewonnenen Informationen stehen ergänzende Assimilations-Datensätze im Fokus. Erstere definieren sich insbesondere über die lokal und regional gewonnenen troposphärischen Laufzeitverzögerungen aus GNSS dem sachgerecht zu erweiternden Footprint-Netzwerk (siehe hierzu auch Objective 9 in „Infrastruktur“). Letztere umfassen beispielsweise die Bodenmeteorologie, lokale Messungen mit dem Wasserdampfradiometer sowie Radiosonden-Aufstiege und weiterhin – je nach Realisierungsmöglichkeit – Wolkenbedeckungsdaten sowie Temperatur-Profile. Auf diese Weise wird das stark empirisch aufgebaute Modell WATSON angetrieben.

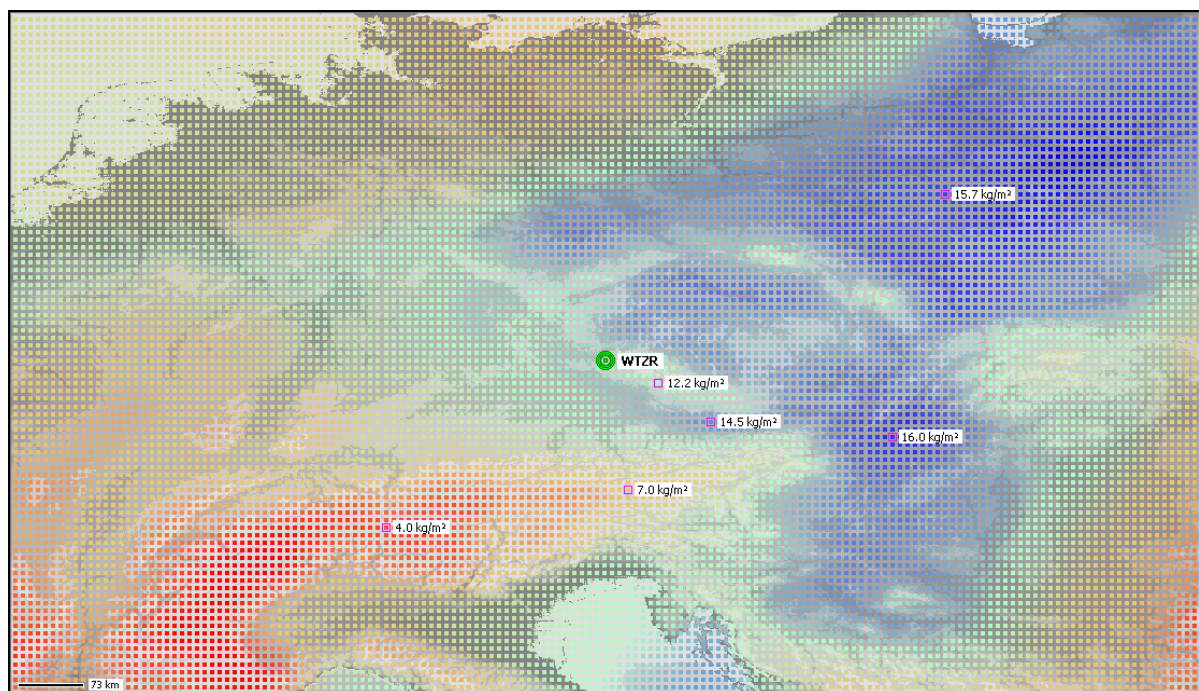


Abbildung 3-9: Verteilung des integrierten Wasserdampfgehaltes am 10. Februar 2015 in der Region um das Geodätische Observatorium Wettzell aus Wettermodell-Daten, auf die Modell-Orographie referenziert

2. Nutzung von SOS-W als Atmosphären-Profiler

Mit SOS-W steht ein wissenschaftlich sehr interessantes SLR-Messsystem zur Verfügung, das nicht nur zu reinen SLR-Nutzungen taugt, sondern auf Grund seiner echten Zwei-Farben-Fähigkeiten zur Ermittlung von Atmosphären-Profilen herangezogen werden kann. Diese Methode soll kritisch untersucht werden. Ebenso ist im Forschungszeitraum zu eruieren, inwieweit SOS-W erfolgreich als Wasserdampf-LIDAR zur Ableitung von Vertikalprofilen der Wasserdampf-Verteilung über der Station Verwendung finden könnte.

3. Nutzung der erfassten atmosphärischen Informationen in der Datenanalyse

Die erfassten atmosphärischen Informationen sollen einen Beitrag zur verbesserten Datenanalyse der geodätischen Messsysteme liefern. Entsprechende Modellierungsansätze sollen auf ihr Potential zur Trennung atmosphärischer Störeinflüsse untersucht werden. Als konkretes Beispiel sollen kontinuierliche Radiometermessungen zur hemisphärischen Modellierung von Delayvariationen herangezogen werden.

Gleichzeitig wird mit den erfassten atmosphärischen Daten auch ein direkter Beitrag zum Monitoring des Phänomens Klimawandel geleistet. In diesem Zusammenhang spielt der integrierte Wasserdampfgehalt eine wichtige Rolle (auf ihn gehen ca. 62% des natürlichen Treibhaus-Effektes zurück), ebenso spielen aber auch zuverlässige Informationen über die Wolken-Bedeckungsgrade eine sehr wichtige Rolle. Entsprechende Sensorik ist ohnehin Bestandteil von Infrastruktur-Maßnahmen, da Wolken-Bedeckungsdaten zukünftig für VLBI-Messungen im Ka-Band benötigt werden, die wesentlich stärker vom Wetter abhängen als Messungen im X-, S- oder auch L-Band.

Objective 2 Monitoring und Modellierung von Deformationen in der Region Wettzell

Lokale Deformationen in der Region Wettzell müssen fortlaufend erfasst und analysiert werden, um sicherzustellen, dass die lokal am Observatorium erfassten Messdaten regional repräsentativ sind. Hierzu sollen neben GNSS-Daten des Footprint-Netzwerks auch weitere Sensoren herangezogen werden. Der Parallelbetrieb verschiedener geometrischer und gravimetrischer Sensoren erlaubt die redundante Erfassung von Auflastdeformationen und erfordert eine konsistente Modellierung.

1. Lokale und regionale Deformationsanalyse

Der Nachweis der geometrischen Stabilität in der Region Wettzell soll zukünftig nicht mehr einseitig auf die GNSS-Technik abstellen. Als Ergänzung bzw. zur Verdichtung dieser punktuellen Daten wird die Eignung des PSInSAR-Verfahrens untersucht. Dabei werden die Rückstreuesignale von SAR-Satelliten wie beispielsweise TerraSAR-X an „Persistent Scatterern“, also dauerhaften, stabilen Rückstreuern interferometrisch ausgewertet. Dies können natürliche Objekte (z.B. Felsen), künstliche Objekte (z.B. Häuserecken) oder aber auch speziell für diesen Zweck geschaffene Corner-Reflektoren sein (auf dem Observatorium sind zwei solche Reflektoren bereits installiert). In Abhängigkeit von der Wellenlänge, geometrischen Konfiguration, Sensorauflösung und zeitlichen Verteilung der Szenen sind hierbei Deformationen von wenigen mm über mehrere Jahre nachweisbar. Anhand vorhandener TerraSAR-X Datensätze wird zunächst die Eignung des Verfahrens für die vorliegende Fragestellung überprüft. Weiterhin wird die Sentinel-1-Mission in die Betrachtung mit einbezogen. In einem zweiten Schritt ist in Abhängigkeit von der Machbarkeitsprüfung zu planen, ob und inwieweit in diesem ländlichen Gebiet die zu erwartende geringe Dichte von Persistent Scatterern ggf. durch künstliche Reflektoren erhöht werden kann. Die bestehenden Corner-Reflektoren werden in die Analyse einbezogen und können auch für Vali-

dierungszwecke verwendet werden. Einerseits stellen diese ideale Persistent Scatterer dar, andererseits können sie terrestrisch sehr genau eingemessen werden. Damit stellen die Reflektoren die Verbindung zwischen PSI und GNSS bzw. dem lokalen Vermessungsnetz dar. Gleichzeitig können sie unabhängig durch SAR absolut positioniert werden (siehe auch Objective 5).

Für den Nachweis der lokalen Stabilität dient primär das terrestrische Vermessungsnetz, das mit Hilfe der verschiedenen permanenten GNSS-Punkte auf dem Stationsgelände und kampagnenweise durchgeführter GNSS-Messungen auf Messpfeilern des terrestrischen Netzes in das geozentrische Koordinatensystem transformiert wird. Dabei ergeben sich systematische Klaffungen zwischen den nivellitischen und den mit GNSS bestimmten ellipsoidischen Höhen, die mit dem regionalen Geoid nicht übereinstimmen. Zur Klärung soll mit zusätzlichen Methoden wie räumlich hochaufgelösten Schweremessungen, der Modellierung des lokalen Schwerfeldes auf der Basis eines digitalen Geländemodells oder dem Einsatz einer Zenitkamera die Orientierung der lokalen Geoidfläche bestimmt werden (s. 0, Objective 1).

2. Kombinierte gravimetrische und geometrische Überwachungsmessungen

Der in seinem Umfang in Wettzell einmalige Parallelbetrieb verschiedener geometrischer und gravimetrischer Messeinrichtungen erlaubt die redundante Erfassung von Deformationen z.B. durch atmosphärische, hydrologische oder ozeanische Auflasten. Hierbei ist die Kombination des absoluten Verschiebungsbetrages der geometrischen Verfahren (VLBI, SLR, GNSS, SAR) mit der hohen Messauflösung der gravimetrischen Verfahren (SG, AG, Tilt) besonders vielversprechend. Mit diesem Ansatz können existierende Auflastmodelle in Wettzell beispielhaft validiert werden. Schwerpunkt ist hierbei die Trennung der Effekte von Massenanziehung und geometrischer Verschiebung.

3. Integrale Modellierung geometrischer und gravimetrischer Veränderungsprozesse

Die in den vergangenen Jahren durchgeführten Modellierungen zur Bestimmung der atmosphärischen und hydrologischen Attraktionskomponenten in Zeitreihen der supraleitenden Gravimeter bieten eine gute Grundlage für die Quantifizierung der damit einhergehenden Deformationen. Damit sollen atmosphärische und hydrologische Auflastmodelle optimiert werden, um verbesserte Korrekturmodelle auch für die geodätischen Raumverfahren zur Verfügung zu stellen. Mit dem gleichen Verfahren können in küstennahen SG-Standorten ozeanische Auflastdeformationen besser quantifiziert werden. Hierbei ist vor allem die Kopplung von atmosphärischem Luftdruck und Ozeanbodendruck und die daraus resultierende effektive Auflast (inverses Barometer) von besonderem Interesse.

Objective 3 Korrektur atmosphärischer und hydrologischer Attraktionseffekte auf Gravimeter und Tiltmeter

Die Messungen von Gravimetern und Tiltmetern werden signifikant beeinflusst durch atmosphärische und hydrologische Attraktionseffekte. Diese müssen daher fortlaufend erfasst und modelliert werden.

1. Erfassung hydrologischer Umweltparameter am Geodätischen Observatorium Wettzell

In Kooperation mit der Sektion 5.4 „Hydrologie“ des GFZ wird ein umfangreiches Messnetz hydrologischer Sensoren betrieben. Aus der Registrierung von Grundwasserstand, Bodenfeuchte, Oberflächenabfluss und Schnee sowie meteorologischen Parametern wird eine hydrologische Massenbilanz aufgestellt. Mit einem Lysimeter, das in der Nähe eines der beiden Supraleitenden Gravimeter installiert ist, werden Massenvariatio-

nen in der oberen Bodenschicht bis 1.5 m direkt erfasst. Diese Daten ermöglichen eine Modellierung der für direkte Messungen nicht zugänglichen ungesättigten Zone. Besondere Bedeutung haben Bodenfeuchtemessungen in direkter Nähe des gravimetrischen Sensors, da deren Einfluss besonders groß ist. Die Sensoren, die beim Bau des neuen Gravimeterhaus neben dem Pfeiler des SG eingebracht wurden, erlauben die Bestimmung dieses Anteils und sollen gezielt in die Modellierung eingebracht werden. Unter Berücksichtigung der Topographie wird anschließend das Schweresignal berechnet, das auf den gravimetrischen Sensor wirkt. Nach Validierung mit der Registrierung des Gravimeters wird daraus ein Korrekturmodell für lokale hydrologische Massenänderungen abgeleitet. Diese lokale Korrektur erlaubt nicht nur eine bessere Gezeitenmodellierung, sondern auch die Separation hydrologischer und atmosphärischer Deformationseffekte und ist damit eine Voraussetzung für die in Abschnitt 2.2. genannten Ziele. Die Horizontalkomponenten der Modellierung sollen als Korrektur für die Registrierung der Tiltmeter beim Ringlaser angewendet werden. Ein weiteres Ziel ist die Evaluierung des Einsatzes Supraleitender Gravimeter zur Bestimmung lokaler Wasserspeicheränderungen in der Hydrologie.

2. *Erweiterung der automatisierten Berechnung der atmosphärischen Korrekturzeitreihen (Atmacs) auf weltweite Stationen des GGP*

Das BKG bezieht regelmäßig Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus den Analysen für die Wettervorhersage. Es hat sich gezeigt, dass eine daraus berechnete Korrektur von Atmosphäreneffekten in den Gravimeterzeitreihen deutlich effizienter ist als die klassische Luftdruckkorrektur. Die Modellierung der Nahzone durch einen analytisch integrierbaren Zylinder ist nur für das Europäische Modell COSMO-EU geeignet. Mit einer für das Dreiecksgitter der Globalmodelle des DWD (GME bzw. ICON) geeigneten Berechnung des Nahfeldes können dann diese Korrekturen für jede Station weltweit, also auch für alle Stationen des GGP, zur Verfügung gestellt werden. Damit wird es möglich sein, diese Atmosphärenkorrektur bei der Bereitstellung der Produkte des zukünftigen Service IGETS der IAG einzubinden.

3. *Regelmäßige Berechnung hydrologischer Korrekturzeitreihen für den Gravimeterstandort Wettzell*

Die unter Punkt 1 beschriebenen Korrekturen sollen regelmäßig berechnet werden und so die Standard-Korrektur für die Zeitreihen der Supraleitenden Gravimeter erweitern. Dadurch wird auch die Vorverarbeitung der Zeitreihen erheblich vereinfacht, da die Variation des residualen Signals erheblich reduziert wird. Die Korrektur kann dann auch für Absolutschweremessungen eingesetzt werden und erlaubt so eine schnellere Einschätzung der Stabilität der Absolutgravimeter.

Objective 4 Monitoring des statischen und zeitvariablen Schwerefeldes

Das Schwerefeld spiegelt die Massenverteilung und Massentransportprozesse im System Erde wieder, die mit Veränderungsprozessen des globalen Wasserkreislaufs, dem Abschmelzen von Eismassen oder tektonischen Prozessen und Erdbeben in Zusammenhang stehen. Satelliten-Schwerefeldmissionen sind, neben dem Bodennetzwerk und geodätischen Raumverfahren, integraler Bestandteil der GGOS-Infrastruktur. Verglichen mit den anderen Grundpfeilern Geometrie/Kinematik und Erdrotation ist die Komponente Schwerefeld aber auch nach der überaus erfolgreichen Realisierung der Missionen der ersten Generation, CHAMP, GRACE und GOCE, noch am weitesten von den ambitionierten GGOS 2020-Zielen entfernt. Im GGOS-Kontext spielen Schwerefeldbeobachtungen nicht nur zur Ableitung globaler und regionaler Massenveränderungsprozesse eine Rolle, sondern auch für die Definition von physikali-

schen Höhensystemen und über die niedrigen harmonischen Koeffizienten auch für die Datumsdefinition terrestrischer Bezugsrahmen (Maßstab, Ursprung, Orientierung). Eine weitere Ankopplung an lokale Beobachtungsstationen wie das Geodätische Observatorium Wettzell sind dadurch gegeben, dass zahlreiche lokale Massenveränderungsprozesse von globalen oder regionalen Phänomenen angetrieben werden und nur über eine skalenübergreifende Beobachtung und Modellierung erfasst werden können. In einer international koordinierten Initiative soll, über die bereits gesicherte GRACE Follow-On-Mission hinaus, eine nachhaltige Beobachtung des Schwerefeldes aus dem Weltraum als Teil der GGOS-Infrastruktur sichergestellt werden, da lange Beobachtungszeitreihen eine Grundvoraussetzung sind, um beispielsweise natürliche von anthropogen verursachten Effekten der Klimaveränderung gesichert zu trennen und robuste Trends abzuleiten.

1. Analyse von Satelliten-Beobachtungszeitreihen

Die Ableitung optimaler Produkte aus Satelliten-Sensorzeitreihen erfordert, die spezifischen Charakteristiken der Sensorik bestmöglich zu verstehen. Auch nach Beendigung bzw. in der Endphase der aktuellen Missionen gibt es in den Zeitreihen von Akzelerometern, Sternsensoren und auch GNSS-Empfängern eine Reihe von noch nicht vollständig verstandener Phänomene, wie z.B. die typischen „Twangs“ in den GRACE-Akzelerometerdaten oder die Korrelationen in GOCE- und Swarm-Bahnen mit dem Erdmagnetfeld. Weiterführende Untersuchungen sind notwendig, nicht nur um die Auswirkung von Artefakten auf Schwerefeldlösungen abzuschätzen und diese weiter zu verbessern, sondern auch um für zukünftige Schwerefeldmissionen zu lernen.

2. Weiterentwicklung von Methodik, Stochastik und Numerik zur zeitlich und räumlich hochauflösenden globalen und regionalen Schwerefeldanalyse

Innerhalb der FGS wurden zahlreiche Methoden zur globalen und regionalen Schwerefeldanalyse entwickelt und erfolgreich auf Satelliten-, Flugzeug- und terrestrische Daten angewendet. Eine Grundvoraussetzung zur Bestimmung hochqualitativer Schwerefeldmodelle ist eine gute stochastische Modellierung der Beobachtungszeitreihen, was eine genauere Kenntnis der Instrumentencharakteristiken bedingt (siehe Punkt 1), die effizient in den Ausgleichungsprozess einzuführen ist. Im Bereich der globalen Schwerefeldanalyse ist es das Ziel, die dabei auftretenden sehr großen Normalgleichungssysteme streng zu lösen, was die räumliche Auflösung der globalen Modelle trotz des Einsatzes von Supercomputing heute auf maximale Grade von ca. 1000 (ca. 20 km räumliche Wellenlänge, ca. 1 Million Parameter) limitiert. Effiziente Algorithmen sollen entwickelt werden, um eine noch höhere räumliche Auflösung zu ermöglichen. Gleichzeitig sollen weiterführende Studien durchgeführt werden, ob die übliche numerische Rechengenauigkeit ausreicht, um hochgenaue Messzeitreihen, wie sie z.B. bei GRACE Follow-On von der Intersatelliten-Distanzmessung mittels Laserinterferometrie geliefert wird, verlustfrei auswerten zu können. Im Bereich der Modellierung des zeitvariablen Schwerefeldes sollen innovative Methoden zur besseren raumzeitlichen Modellierung entwickelt werden, um die heute limitierenden Effekte wie zeitliches Aliasing bzw. Leakage-Effekte durch verbesserte Parametrisierung reduzieren zu können. Im Bereich der regionalen Schwerefeldmodellierung sollen bestehende Verfahren, wie Ko-Lokation und die Multiskalenanalyse, methodisch verbessert und gegeneinander validiert werden. Im Bereich der Multiskalenanalyse ist die Implementierung eines pyramidalen Algorithmus zur Effizienzsteigerung vorgesehen.

3. *Kombination von Schwerfeldbeobachtungen aus Schwerfeldmissionen mit terrestrischen Schweremessungen und Satellitenaltimetrie*

Die Kombination von Schwerfelddaten soll skalenübergreifend erfolgen. Im Bereich der globalen Kombination sind hochauflösende Modelle mit einer räumlichen Auflösung von 100-200 m geplant, wobei neben Satelliten-, Flugzeug- und terrestrischen Daten in Gebieten mit schlechter Datengrundlage aus Topographie synthetisierte Schwerfeldmessungen herangezogen werden sollen. Im Bereich der Ozeane sollen diese Daten mit aus Satellitenaltimetrie abgeleiteter Schwerfeldinformation kombiniert werden, wobei die Berücksichtigung der Ozeantopographie erforderlich ist (siehe Objective 6, Punkt 3). Im Sinne der Konsistenz von Geometrie und Gravimetrie sollen SLR- und Satellitenbahn-Beobachtungen verwendet werden, um insbesondere die Robustheit der Schätzung der niedrigen harmonischen Koeffizienten zu steigern. Sowohl im Bereich globaler als auch regionaler Schwerfeldmodellierung sollen Methoden zur Bestimmung der optimalen relativen Gewichtung der einzelnen Beobachtungstypen im Rahmen der Kombination verbessert werden. Mit der Entwicklung eines effektiven pyramidalen Algorithmus (siehe Punkt 2) lässt sich auch die Multiskalendarstellung global und regional zur spektralen Kombinationen verschiedener Eingangsdaten nutzen. Bei rauer Topographie beispielsweise, bei schlechter oder nicht definierter terrestrischer Datenqualität sowie bei spärlich oder inhomogen verteilter terrestrischer Daten – wie dies häufig bei Entwicklungs- und Schwellenländer der Fall ist – soll die Multiskalendarstellung zur optimalen Datenkombination weiterentwickelt und zur Realisierung eines regionalen Höhensystems eingesetzt werden. Die Kombination von Schwerfeldobservablen und geometrischen Beobachtungen soll auch zur Vereinheitlichung von physikalischen Höhensystemen genutzt werden. Die zentrale Aufgabe ist dabei die Bestimmung der Niveaudifferenzen (bzw. Transformationspa-



Abbildung 3-10: GOCE Satellit im Orbit (ESA)

parameter) zwischen den lokalen Vertikaldatumsrealisierungen und einem globalen Bezugsniveau aus (1) GNSS-Beobachtungen an Referenzstationen des ITRF und seiner regionalen Verdichtungen (z.B. SIRGAS, EUREF), (2) GNSS-Beobachtungen an Pegeln (TIGA), (3) geopotentiellen Knoten aus Nivellement, (4) der durch Pegelregistrierungen verfeinerten Meerestopographie aus Satellitenaltimetrie entlang der Küstenlinien sowie (5) mittels terrestrischer Schweredaten und Satellitenschwerefeldmodelle.

4. Simulationen von Konzepten für neue Satellitenmissionen

Die Realisierung zukünftiger Schwerefeldmissionen mit signifikant verbesserter Genauigkeit ist eine Grundvoraussetzung, um die GGOS-Ziele im Bereich Schwerefeld erfüllen zu können. Dabei ist die Simulation zukünftiger Schwerefeldmissionen erforderlich, um den Einfluss von neuen Missionskonzepten, Sensortechnologien und -genauigkeiten abschätzen und deren Mehrwert gegenüber aktuellen Missionen quantifizieren zu können. Missionskonfigurationen aus mehreren Satelliten, wie z.B. Doppelpaar- oder gar Multipaarmissionen, ermöglichen es, gleichzeitig die räumliche und zeitliche Auflösung zu erhöhen. Durch die Identifikation optimaler Bahnkonfigurationen und die methodische Weiterentwicklungen der Auswertetechnik, wie z.B. verbesserte raum-zeitliche Parametrisierung (siehe Punkt 2), sollen die derzeit limitierenden Faktoren wie zeitliches Aliasing und mangelnde Separierbarkeit geophysikalischer Signale reduziert werden. Neuartige und innovative Missionskonzepte, wie z.B. die hochgenaue Distanzmessung zwischen geostationären oder GNSS- und niedrigfliegenden Satelliten, sollen im Detail hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaften und ihrer technischen Realisierbarkeit untersucht werden. Mittel- bis langfristiges Ziel ist es außerdem, komplementär zu der im Rahmen von GGOS durchgeführten Optimierung der Bodeninfrastruktur auch eine Simulation der GGOS-Satelliteninfrastruktur zu bewerkstelligen, wobei neben Schwerefeldmissionen auch Altimetrie- und geodätische Satelliten mit eingeschlossen sind.

5. Entwicklung von Anwendungsstrategien zur Nutzung von globalen und regionalen Schwerefeldern in der geophysikalischen Erdmodellierung

Für die hochauflösenden regionalen und globalen Modelle des Erdschwerefeldes sollen – in Kooperation mit potentiellen Nutzern – Anwendungsstrategien entwickelt werden, um das Potential der Schwerefeldmodellierung innerhalb der Erdsystemforschung zur Geltung zu bringen. Es liegt nahe, nicht nur Daten des Schwerepotentials zu betrachten, sondern auch Magnetfelddaten der Swarm-Mission mit einzubeziehen. In einem ersten Schritt soll untersucht werden, inwieweit terrestrische und Satellitendaten geeignet sind, um Beiträge zur geophysikalischen Erdmodellierung zu liefern. In einem nächsten Schritt soll darüber hinaus die Kombination mit seismischen Daten erfolgen.

Objective 5 Monitoring von Deformationsprozessen auf unterschiedlichen Skalen

Deformationsprozesse der Erdoberfläche äussern sich auf unterschiedlichen Skalen, durch geometrische Verschiebungen und Schwerefeldveränderungen. Deren Monitoring erlaubt die Verbesserung der entsprechenden Modelle, während präzise Modelle für die stabile Realisierung des Raumbezugs erforderlich sind. Die FGS arbeitet in mehreren dieser Bereiche. Im Rahmen des Projektes PN5 der DFG-Forscherguppe „Referenzsysteme“ (FOR 1503) werden geophysikalischer Hintergrundmodelle validiert und deren Nutzung zur Berechnung des Referenzrahmens untersucht (s. auch Schwerpunkt 1, Objective 4). Im Rahmen des Forschungsprogramms 2016-2020 sollen die folgenden Aufgaben bearbeitet werden.

1. Analyse von Zeitreihen

Die Analyse von Zeitreihen ist eng verknüpft mit dem Schwerpunkt 1 „Raumbezug“ (siehe z.B. Objective 4: „Konsistente Verknüpfung der Messsysteme und Raumverfahren“). Aus der Analyse der GNSS-, SLR- und VLBI-Daten und deren Kombination zur Berechnung von Referenzrahmen sowie zur konsistenten Bestimmung von CRF, TRF und EOP resultieren Zeitreihen für diese Parametergruppen. Im globalen Rahmen werden die Zeitreihen der GNSS-, SLR-, VLBI- und DORIS-Stationen analysiert, um deren nicht-lineares Verhalten zu erfassen. Auf diese Weise lassen sich z.B. die Auswirkungen von geodynamischen Prozessen studieren. Diese Arbeiten tragen auch zu der weiter unten beschriebenen Aufgabe „Modellierung nicht-gezeitenbedingter Auflastdeformationen“ (siehe Punkt 4) bei. Es sollen auch die Zeitreihen regional verteilter GNSS-Stationen analysiert werden, die wichtige Informationen zu langzeitlichen tektonischen Prozessen, den Auswirkungen starker Erdbeben und post-seismischer Deformationen liefern. Derartige Zeitreihen resultieren beispielsweise aus den EUREF- und SIRGAS-Berechnungen. Auch die vom DGFI im bayerischen Alpenraum betriebenen GNSS-Stationen des Geodetic Alpine Integrated Network (GAIN) sind in diesem Kontext von großem Interesse. Des Weiteren resultieren aus der Berechnung von Epochenreferenzrahmen und der gemeinsamen Schätzung von TRF, EOP und den niederen harmonischen Schwerefeldkoeffizienten kombinierte Zeitreihen, die eine wichtige Grundlage für die Analyse des zeitlichen Verhaltens dieser Parameter schaffen.

2. Kombination von GNSS und absoluten SAR-Beobachtungen zur flächenhaften Erfassung zeitlicher Veränderungen in der Geländetopographie

Mit Hilfe der zwei 1.5 m Radar-Reflektoren am Geodätischen Observatorium Wettzell wird seit Sommer 2011 in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) die absolute Messgenauigkeit der Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X untersucht. Die Reflektoren sind in das Stationsnetz eingebunden und verfügen über globale Koordinaten, welche die Referenz für die SAR-Messungen der beiden Satelliten darstellen. Durch die Korrektur der externen Fehlereinflüsse (Atmosphäre und Geodynamik) sowie der Verbesserung des SAR-Prozessors konnte die absolute Messgenauigkeit von nominell 1 m auf 1-2 cm gesteigert werden. Zudem ermöglicht die Kombination mehrerer solcher SAR-Messungen eine absolute Positionierung im Bereich der genannten Messgenauigkeit, und bei langen Zeitreihen, wie sie unter anderem für das Observatorium Wettzell erstellt werden, auch die Bestimmung von säkularen Deformationen (Plattentektonik, postglaziale He-

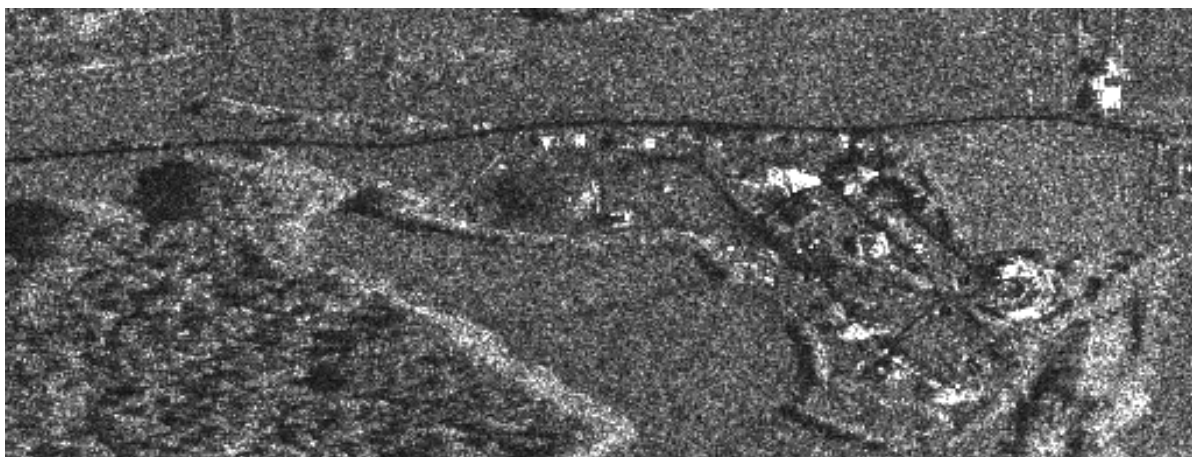


Abbildung 3-11: TerraSAR-X Radaraufnahme des Geodätischen Observatoriums Wettzell. Der SAR-Reflektor befindet sich links oberhalb der Bildmitte auf dem Ringlaserhügel (DLR).

bung). Die künftigen Untersuchungen am Observatorium Wettzell zielen auf die großräumige Verwendung dieser Messverfahren ab, was die Kombination von absoluten SAR-Beobachtungen und GNSS für Deformationsmessungen ermöglichen soll.

Es soll zudem untersucht werden, inwieweit sich die absoluten SAR-Verfahren (siehe Punkt 2) zur Bestimmung der postglazialen Hebung eignen. Als säkulare Geometrieänderung wirkt sich diese auch auf das Schwerfeld aus und stellt deshalb ein Unsicherheitsfaktor in der gravitativen Bestimmung von Eismassenvariationen dar. Zudem soll im Rahmen der Wettzell-SAR-Experimente die Anbindung von Pegelstationen an geodätische Netze untersucht werden, indem unterschiedliche Möglichkeiten von SAR zur Übertragung von Höhen getestet werden.

3. Modellierung nicht-gezeitenbedingter Auflastdeformationen der festen Erde

In aktuellen Realisierungen globaler terrestrischer Referenzrahmen, wie z.B. dem ITRF2008, werden Stationsbewegungen über ein lineares Modell parametrisiert. Nichtlineare gezeiteninduzierte Bewegungen, z.B. die Gezeitendeformation des Erdkörpers, werden durch Modelle beschrieben, die in den Konventionen des IERS (Petit et al., 2010) dokumentiert sind. Zahlreiche nichtlineare Effekte sind jedoch nicht durch Modelle erfasst. Dazu zählen etwa Deformationen durch atmosphärische, ozeanische oder hydrologische Auflaständerungen. Solche nicht-modellierte Stationsbewegungen mit einer Größenordnung von teilweise mehreren Zentimetern beeinflussen die Mehrzahl der global verteilten geodätischen Beobachtungsstationen und sind ein wesentlicher Faktor für die Begrenzung der Genauigkeit der aktuellen ITRF-Realisierungen. Neben saisonalen Variationen durch Auflaständerungen verursachen Erdbeben abrupte Stationsverschiebungen von bis zu mehreren Metern, denen oft eine jahrzehntelange nichtlineare Deformationsbewegung der Erdkruste nachfolgt.

Nichtlineare Stationsbewegungen sollen über die Berechnung von zeitlich hoch aufgelösten terrestrischen Referenzrahmen, sogenannten Epochenreferenzrahmen (ERFs), untersucht werden (s. auch Schwerpunkt 1, Objective 4). Dabei werden Zeitreihen von intertechnischen sowie technikspezifischen globalen und regionalen ERFs untersucht und mit aus Modellen abgeleiteten Zeitreihen der Deformationsprozesse verglichen. Auch eine Erweiterung des funktionalen Modells der Stationsbewegungen um Parameter für nichtlineare Signalanteile ist vorgesehen. Dabei sollen zusätzlich zu den bisher üblichen konstanten Bewegungsraten jährliche und halbjährliche Signale für die Approximation saisonaler Variationen sowie logarithmische Funktionen für die Approximation post-seismischer Deformationen geschätzt werden. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der konsistenten Realisierung des geodätischen Datums und der simultanen Schätzung von Stationspositionen und EOP.

Objective 6 Dynamische Prozesse im Erdsystem

Die Geodäsie hat sich zu einer wichtigen Disziplin zur Erforschung des Systems Erde entwickelt. Die Beobachtung und Beschreibung von Veränderungen in der kontinentalen Hydrologie, der Kryosphäre, der Meeresoberfläche und der Atmosphäre ist die Grundlage zum Verständnis der geophysikalischen Prozesse in und zwischen diesen Komponenten des Erdsystems. Zentral ist hier die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den entsprechenden geophysikalischen Disziplinen.

1. Kontinentale Hydrologie: Ableitung von Wasserstandshöhen und Speichervariationen für Inlandgewässer aus Altimetrie und Schwerfeldmissionen

Die Überwachung von kontinentalen Wasserreserven und das Monitoring von Extremereignissen wie Überflutungen und Dürren werden im Kontext

des Klimawandels immer wichtiger. Die Satellitenaltimetrie kann hier einen wichtigen Beitrag leisten, gerade in Gebieten mit wenig Infrastruktur und fehlenden lokalen Pegelmesssystemen. Die vorhandene Datenbasis (Datenbank DAHITI, <http://dahiti.dgfi.tum.de>) soll ausgebaut werden und die Methodik bedarf einiger Weiterentwicklungen, um auch für kleinere Gewässer verlässliche Zeitreihen von Wasserstandsvariationen zur Verfügung stellen zu können. Des Weiteren wird eine Automatisierung der Prozessierung sowie die Erzeugung realistischer Fehlermaße für die Wasserhöhenzeitreihen angestrebt. Neben den klassischen Altimetermissionen mit kurzen Wiederholzyklen (10-35 Tage, z.B. Jason-2 oder Saral) sollen in Zukunft auch Daten von Missionen mit langem Wiederholzyklus und engem Bahnspurmuster genutzt werden (z.B. Cryosat). Dazu ist eine Ergänzung zum klassischen Prinzip der virtuellen Stationen und die Betrachtung ganzer Flusssysteme anstelle einzelner Überflugsunkte notwendig. Die Verknüpfung der raumzeitlich unregelmäßig verteilten Beobachtungsdaten stellt dabei eine neue Herausforderung dar.

Um auch neue und zukünftige Missionen nutzen zu können, ist eine Auseinandersetzung mit neuen Messtechnologien, wie SAR-Altimetrie (Cryosat, Sentinel-3) und „wide swath altimetry“ (SWOT) vorgesehen. Die Satellitenaltimetrie liefert absolute Gewässerhöhen sowie deren zeitliche Veränderungen. Um von den Wasserständen auf für viele Anwendungen wichtige Informationen wie Wasserspeichermenge oder Durchflussmengen zu gelangen, ist die Verknüpfung der Altimeterdaten mit externen Zusatzinformationen notwendig. Unter Zuhilfenahme von Fernerkundungsdaten soll die Oberflächenausdehnung der Gewässer mit dem Wasserstand verknüpft werden, um Wasservolumina abzuleiten.

Hydrologische Speichervariationen lassen sich auch aus Messungen von Variationen des Schwerefeldes ableiten. Die Satellitenmission GRACE, welche zeitliche Veränderungen des Erdschwerefeldes misst, ermöglicht einen Rückschluss auf Massenveränderungen und damit auch auf Variationen der kontinentalen Wasserspeicherung. Mittels eines alternativen Ansatzes, basierend auf Reihenentwicklungen in radialen Basisfunktionen, sollen hydrologische Speichervariationen in ausgewählten Regionen modelliert sowie Anomalien und Extremereignissen wie Fluten, Dürren oder auch langzeitliche Trends detektiert und analysiert werden. Auch die Möglichkeit von Vorhersagen von hydrologischen Verläufen und z.B. Wetterextrema soll untersucht werden.

2. Kryosphäre: Monitoring von Eismassenvariationen von Eisschilden

Die umfassende und genaue Beobachtung und Beschreibung geophysikalischer Prozesse in, auf und an den Eisschilden ist von hohem wissenschaftlichem Interesse. Diese Regionen sind einer hohen Dynamik sowohl linearer als auch in Teilen beschleunigter Natur unterworfen. Das Auftreten von Abschmelzprozessen und Massenverlagerungen in der Kryosphäre sind, wie beispielsweise im IPCC Bericht von 2014 dargelegt, von hoher Bedeutung für globale Klimavariablen wie dem Meeresspiegel, oder von Temperatur und Salzgehalt des Meerwassers. Die Massenvariationen werden mittels Kombination diverser Beobachtungstechniken erfasst und beschrieben. Diese sind unter anderem:

- a) Satelliten- und flugzeuggetragene Laser- und Radaraltimetrie zur flächigen Bestimmung von Veränderungen der Oberflächengeometrie,
- b) GNSS-Beobachtungen zur punktwisen Bestimmung von Höhenänderungen sowie zur Ermittlung von Geschwindigkeitsprofilen,
- c) Zeitvariable Schwerefeldlösungen aus GRACE- und GOCE-Beobachtungen zur Bestimmung von großflächigen Massenänderungen bzw. -verlagerungen.

Zusammen mit diesen Techniken werden diverse Korrektur- und Hintergrundmodelle angewandt (z.B. GIA, Schneefall- und Abschmelzmodelle, Schneekompaktionsmodelle u.v.a.). Limitierende Faktoren stellen zum einen zu wenige bzw. in der Zeit zu kurze Beobachtungsreihen dar. Zum anderen wird die räumliche und zeitliche Auflösung durch die Güte der Beobachtungen und Hintergrundmodelle beschränkt. Hier gilt es, eine konsistente Prozessierungsumgebung zu schaffen. Eine umfassende stochastische Modellierung des Gesamtprozesses der Bestimmung von Eismassenvariationen liefert die Grundlage zur Identifikation bestehender Schwachstellen und optimalen Kombination der im Sinne von Art, Genauigkeit und Verfügbarkeit heterogenen Beobachtungen. Ziel ist es Eismassenvariationen von Eisschilden durch die Weiterentwicklung der Methodik zu quantifizieren (inklusive verbesserter Eingangsdatenprozessierung) und die Qualität dieser Zielgröße durch eine erweiterte und umfassendere stochastische Beschreibung zu bewerten.

3. *Meeresoberfläche: Analyse und Beschreibung von Meeresspiegelvariationen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen*

Die Ozeane bedecken etwa zwei Drittel der Erdoberfläche und ihre Dynamik und Wechselwirkung mit anderen Erdsystemkomponenten beeinflusst weite Teile des menschlichen Lebens. Der globale Meeresspiegelanstieg von ca. 3 mm/Jahr ist einer der prominentesten Indikatoren des globalen Wandels. Aber nicht nur säkulare und großflächige Veränderungen des Meeresspiegels sind von Bedeutung, sondern auch Prozesse in anderen Raum- und Zeitskalen. Mit Hilfe der Satellitenaltimetrie lassen sich viele der geometrischen Veränderungen erfassen. Dabei sind lange Zeitreihen mit konsistentem und eindeutigen Raumbezug essentiell. Diese sind nur durch Multi-Missions-Ansätze realisierbar. Demensprechend stellt die Pflege der Datenbestände (inkl. neue Missionen und Korrekturmodelle) eine Daueraufgabe dar. Zur Verbesserung der Datengrundlage soll außerdem die bisher angewandte Methodik der Kreuzkalibration weiter verbessert und ausgebaut werden, um beispielsweise einen Absolutbezug zum Geozentrum zu gewährleisten und einzelne Fehleranteile mitzuschätzen (z.B. time tag bias). Weiterhin ist ein Expertiseausbau für neue Sensortechnologien (wie SAR, InSAR und SWOT) geplant. Die abgeleiteten Produkte, wie globaler und regionaler Meeresspiegelveränderungen, werden ebenfalls regelmäßig aufdatiert.

Im Bereich der Dynamischen Ozeantopographie (DOT) und der daraus abgeleiteten Oberflächenströmungen wurden in den letzten Jahren sehr gute Ergebnisse im offenen Ozean erzielt. Nun sollen auch die Ergebnisse in Problemgebieten der Altimetrie, vor allem im Küstenbereich und in den polaren Ozeanen mit Meereisbedeckung, verbessert werden. Dazu ist unter anderem die Auseinandersetzung mit speziellen Retracking-Algorithmen und sogenannten Lowest-Levelling Techniken notwendig. Des Weiteren sollen die begonnenen Vergleiche mit in-situ Beobachtungssystemen (v.a. Argo Floats und Driftern) erweitert werden mit dem langfristigen Ziel einer Kombination dieser Daten mit den Altimeterdaten. Außerdem soll das Ziel der gemeinsamen konsistenten Schätzung von Ozeantopographie und Schwerfeld verfolgt werden.

4. *Atmosphäre: Bestimmung atmosphärischer Parameter aus der Kombination geowissenschaftlicher Raumb Beobachtungsverfahren*

Die Atmosphäre der Erde lässt sich in unterschiedliche Schichten einteilen. Je nachdem welche physikalischen und chemischen Prozesse in diesen Schichten dominieren, zeichnen sie sich durch unterschiedliche Eigenschaften aus. Getrieben von der Aktivität der Sonne einerseits und dem Schwere- und Magnetfeld der Erde andererseits, bilden sich Schichten unterschiedlicher Dichte, Zusammensetzung, Temperatur und Ionisierungsgrad aus. In der Geodäsie wird die Atmosphäre heutzutage nicht

mehr nur als Störgröße, sondern auch als Zielgröße betrachtet, da alle geodätischen Messverfahren wertvolle Informationen über die Zustand der Atmosphäre liefern. Demzufolge können aus der Kombination verschiedener Beobachtungsverfahren (z.B. GNSS, Satellitenaltimetrie oder Radiookkulationen) atmosphärische Parameter, wie z.B. die Elektronendichte und der vertikale absolute Elektronengehalt („vertical total electron content“, VTEC) der Ionosphäre oder die Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung („zenith delay“) innerhalb der Troposphäre modelliert und geschätzt werden. Für die Vorprozessierung der VTEC-Eingangsdaten aus Zweifrequenz-GNSS-Beobachtungen wird eine Mapping-Funktion benötigt, welche die realen ionosphärischen Verhältnisse zumeist nur unzureichend wiedergeben kann. Es sollen daher hochauflösende vierdimensionale Modelle der Elektronendichte entwickelt werden, zu deren Stabilisierung insbesondere Radiookkultationsmessungen beitragen. Eine signifikante Genauigkeitssteigerung wird dabei durch die anstehende COSMIC-2-Mission erwartet, deren erste Missionsphase im Jahr 2016 beginnen soll. Neben der Datenauswahl ist zur Modellierung relevanter Zielparameter, wie beispielsweise der Maximalwert der Elektronendichte, auch die Wahl des Funktionensystems von entscheidender Bedeutung. Dabei sind aufgrund der ungleichmäßigen Beobachtungsverteilung datenadaptive Ansätze, wie z.B. die „Multivariate Adaptive Regression B-Spline“ (BMARS) den klassischen Methoden (z.B. Reihenentwicklung in Kugelflächenfunktionen) vorzuziehen.

In Politik und Wissenschaft erfährt das Weltraumwetter, unter dem man die Vorgänge, die im erdnahen Weltraum durch die Sonne und andere kosmische Quellen verursacht werden, versteht, eine immer größere Bedeutung. Da die moderne Gesellschaft von satellitengestützter Technik abhängig ist (z.B. Kommunikations- und Navigationssysteme), wird weltweit an Methoden zur Prädiktion des Weltraumwetters gearbeitet. Bei der Überwachung des Weltraumwetters spielt die Beschreibung und Prädiktion des Ionosphärenzustands mit kurzen Latenzzeiten eine bedeutende Rolle. Durch die Kombination geeigneter Satellitenmissionen wird die Datenverteilung und Datenauflösung global und regional verbessert und eine Schätzung der unbekannten Zielparameter mit höherer Genauigkeit und Auflösung erreicht. Die entsprechenden Messungen werden für viele Satellitenmissionen echtzeitnah oder sogar in Form von Datenströmen von den Providern zur Verfügung gestellt. Durch zusätzliche Berücksichtigung von Sonnenbeobachtungen (koronale Massenausbrüche, Flares, Sonnenwinddaten) können operationelle Systeme betrieben werden, die selbst auf irreguläre Einflüsse rechtzeitig reagieren können. Die Entwicklung eines derartigen Systems zur sequentiellen Erfassung der Klimatologie und Dynamik der Ionosphäre soll in den nächsten Jahren umgesetzt werden. Die Untersuchung der Daten kann außerdem relevante Informationen zur Beschreibung von kurzperiodischen Effekten, wie z.B. Szintillationen oder „Traveling Ionospheric Disturbances“ (TIDs), liefern.

Thermosphäre und Ionosphäre repräsentieren den Übergang der Erdatmosphäre zum Weltraum; sie spielen daher eine zentrale Rolle für das Verständnis des gekoppelten Erde-Sonne Systems. Vor allem stellt auch die thermosphärische Neutraldichte eine wichtige Variable für die Bahnberechnung für Satelliten dar. Die thermosphärische Dichte kann sehr schnell und über weite zeitliche und räumliche Skalen variieren; sie wird sowohl vom Weltraum aus beeinflusst (Absorption von solarer Ultraviolett-Strahlung) als auch durch Klima und Wetter der Hochatmosphäre. Die Wechselwirkungen zwischen Thermosphäre und Ionosphäre, hervorgerufen beispielsweise durch thermosphärische Winde, beeinflussen Satelliten, ihre Instrumente und ihre elektromagnetischen Signale. Im Gegenzug kann man durch das Studium der Bahn und Lage niedrigfliegender Satelliten und das Verhalten ihrer Instrumente und Signale Aufschluss über die Kopplungsmechanismen gewinnen. Aus SLR-Beo-

bachtungen zu verschiedenen Satelliten (z.B. GRACE, GOCE, Swarm, Jason-1/2) lassen sich beispielsweise im Rahmen einer Bahnbestimmung unter Verwendung präziser Makro-Modelle der verwendeten Satelliten thermosphärische Dichten und Winde bestimmen, woraus verbesserte raumzeitliche „Multi-Satellite“ Thermosphärenmodelle resultieren.

Auch die im Fall von Mikrowellenverfahren geschätzten Troposphärenparameter (Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung und horizontale Gradienten) sollen zukünftig bei der TRF-Berechnung kombiniert werden (siehe Schwerpunkt 1, Objective 4). Als Resultat werden gemeinsame Troposphärenparameter für GNSS und VLBI (und ggf. DORIS) erhalten. Dass dies möglich ist und für die Referenzrahmen (insbesondere für Epochenreferenzrahmen) eine Stabilisierung bedeutet, wurde bereits gezeigt. Aufgabe ist es nun, die Kombinationsmethodik weiter zu verbessern, indem insbesondere neue Modelle für die Berücksichtigung des Höhenunterschiede zwischen den Referenzpunkten der Instrumente herangezogen bzw. entwickelt werden. Die Frage, inwieweit optische Messungen (SLR mit vier Frequenzen) mit einbezogen werden können, soll ebenfalls untersucht werden.

Schwerpunkt 3 Infrastruktur

Ziele

- **Technische Weiterentwicklung der Beobachtungsinfrastruktur**

Die Beobachtungsinfrastruktur der FGS ist so weiterzuentwickeln, dass die Beiträge zu den internationalen geodätischen Diensten auf höchstem technisch/technologischen Niveau langfristig gesichert werden. Für das Geodätische Observatorium Wettzell sind die GGOS-Spezifikationen zu erfüllen, damit die Station auch weiterhin eine Spitzenstellung im internationalen Vergleich einnimmt. Einmal werden mit den Investitionen die messtechnischen Voraussetzungen für Entwicklungsarbeiten geschaffen, zum anderen münden die Ergebnisse der Entwicklungsarbeiten in Anforderungen die Weiterentwicklung der technisch-technologischen Beobachtungskomponenten ein. Dies zeigt sich im FGS-Programm durch eine enge Interaktion zwischen den Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkten „Raumbezug“ und „Monitoring geophysikalischer Prozesse“ und „Infrastruktur“.

Aus dem FGS-Forschungsprogramm 2011-2015 folgt, dass in den nächsten Jahren die volle Einsatzfähigkeit der Twin-Radioteleskope und des Satellitenlasersystems SOS-W herzustellen ist, um aus den neuen technischen Möglichkeiten ein maximales Entwicklungspotential für die Realisierung der geodätischen Referenzsysteme zu gewinnen. Darüber hinaus ist am Standort La Plata die Einsatzfähigkeit von TIGO/AGGO sicherzustellen. Im Programmzeitraum wird der Betrieb von AGGO komplett an den argentinischen Partner übergeben. Das BKG wird aber weiter als Partner von den Ergebnissen partizipieren. Der VLBI-Beobachtungsbetrieb auf der Station O'Higgins ist für die bessere Abdeckung von Beobachtungen auf der südlichen Hemisphäre von großer Bedeutung und fortzuführen. Für die geodätische VLBI ist der Remote-Control-Beobachtungsbetrieb durch Automatisierung umzusetzen. Mit Galileo ist durch entsprechende infrastrukturelle Maßnahmen auf der Station Wettzell und im Referenznetz GREF sowie organisatorische Maßnahmen im Bundesbereich die operationelle Verfügbarkeit des Raumbezugs sicherzustellen.

Die Funktion der Gravimeterstation Wettzell als Teil eines globalen absoluten Schwerereferenzsystems soll nachhaltig gefestigt werden. Erste Investitionen für den Einsatz dieses neuen Instrumententyps sind für den Planungszeitraum vorgesehen. Die Entwicklung im Bereich der Nutzung optischer Uhren ist durch erste Investitionen sicherzustellen. Man spricht hier auch von einem Einstieg in die relativistische Geodäsie.

- **Strategische Positionierung der FGS**

Betrieb, Pflege und Weiterentwicklung der Beobachtungsinfrastruktur der FGS betreffen nicht nur die Technologie, die perspektivisch die GGOS-Spezifikationen erfüllen muss, sondern sie erfordern auch Anstrengungen organisatorischer Natur auf administrativer und politischer Ebene, insbesondere im internationalen Zusammenspiel. Zudem spielt die koordinierte Behandlung zentraler wissenschaftlicher Fragen eine wesentliche Rolle.

Zum einen betrifft dies die Einbindung der FGS-Aktivitäten in die Dienste der IAG. Operationell ist dies durch die vielfältigen Beiträge der FGS bei der Ableitung der IAG-Produkte gegeben. In strategischer Hinsicht erfolgt dies dadurch, dass Mitglieder der FGS immer wieder Schlüsselpositionen in der IAG-Struktur besetzen, um auf diese Weise die wissenschaftliche und organisatorische Weiterentwicklung der IAG entscheidend mitzugestalten. Hier sind insbesondere auch die Arbeiten zu GGOS zu nennen, zu denen mehrere FGS-Mitglieder in herausragender Position beitragen. Zum anderen hat die 2011 ins Leben gerufene Initiative Global Geospatial Information Management der Vereinten Nationen (UN-GGIM) erreicht,

dass am 26.02.2015 eine Resolution durch die UN-Generalversammlung angenommen wurde, die die Bedeutung globaler geodätischer Referenzrahmen für die nachhaltige Entwicklung zum Gegenstand hat und die sich mit der dauerhaften Sicherstellung der globalen geodätischen Infrastruktur befasst.

Die Bedeutung des Geodätischen Observatoriums Wettzell als weltweit herausragende Fundamentalstation soll durch entsprechende, strategisch orientierte Aktivitäten im Programmzeitraum 2016 bis 2020 weiter gefestigt und ausgebaut werden. Hierzu ist eine fortgesetzte Beteiligung der FGS an den derzeit laufenden Strategieprozessen unbedingt erforderlich. Insbesondere zu nennen sind im Rahmen der IAG die weitere Implementierung des GGOS sowie im Kontext der Arbeitsgruppe Global Geodetic Reference Frame (GGRF) von UN-GGIM die Erstellung und Implementierung einer Roadmap zur Umsetzung der angesprochenen UN-Resolution.

Die FGS leistet mit Wettzell somit gleichzeitig einen essentiellen Beitrag sowohl zur internationalen Forschungsinfrastruktur als auch zur Daseinsvorsorge im Hinblick auf die Bereitstellung eines homogenen, konsistenten Raumbezugs hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Dies lässt sich nur im internationalen Zusammenspiel gestalten und wirksam umsetzen. Dabei ist es wichtig, dass die Interessen und Kompetenzen der FGS angemessen Eingang finden. Dies ist im Programmzeitraum weiter auszubauen.

Objective 1 Operationeller Messbetrieb im Rahmen der internationalen Dienste der IAG

Auf den Observatorien Wettzell und TIGO werden seit vielen Jahren – im Falle von Wettzell seit gut 40 Jahren – zuverlässig präzise Messungen für die internationalen Dienste der IAG, insbes. den IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry), den ILRS (International Laser Ranging Service) und den IGS (International GNSS Service) erbracht. Zukünftig wird angestrebt, auch für den IDS (International DORIS Service) Messungen durchzuführen. Hiermit wird ein wichtiger Beitrag zur Realisierung und Fortführung (Instandhaltung) des globalen Referenzrahmens ITRF geleistet. Dies ist ein Erfolg, der aus stabilen Rahmenbedingungen hervorgeht, sowohl was die Verfügbarkeit der notwendigen Betriebs- und Investitionskosten angeht, als auch bzgl. der Bereitstellung des qualifizierten Beobachter-Personals.

1. Kontinuierliche Bereitstellung hochwertiger Beiträge der Messsysteme

Ein Hauptanliegen ist die kontinuierliche Weiterführung des operationellen Messbetriebs und die Bereitstellung hochwertiger Beiträge an die internationalen wissenschaftlichen Dienste. Ein sehr hohes Augenmerk muss der Automatisierung sowie der Fernsteuerbarkeit der Messverfahren gewidmet werden (s. Objective 4), was wiederum auch zu deutlich erhöhten Anforderungen an die Systemsicherheit führt. Die verbesserte Fernsteuerbarkeit ist in diesem Zusammenhang für die Antarktis-Station O'Higgins von besonderer Bedeutung, um eine bessere Auslastung und Einbindung in die Netze der VLBI zu gewährleisten (s. Objective 5).

2. Überführung der Twin-Radioteleskope und des SOS-W in den Messbetrieb

Das Geodätische Observatorium Wettzell wird zu einem bedeutenden Bestandteil der GGOS-Bodeninfrastruktur (GGOS Core Site) ausgebaut. In diesem Zusammenhang sind die beiden Twin-Radioteleskope als Bestandteil des zukünftigen VGOS-Netzwerkes (VLBI Global Observing System) des IVS in den operationellen Betrieb zu überführen. Weiterhin sollen die Möglichkeiten eruiert werden, das existierende 20 m Radioteleskop Wettzell (RTW) als einen „Eckpfeiler“ in zukünftigen Netzwerken des IVS zu etablieren. Hierdurch wird der Tatsache Rechnung getragen,

dass auch weiterhin Teleskope mit größerer Apertur benötigt werden, beispielsweise um Messungen zusammen mit empfangsschwächeren Teleskopen zu ermöglichen. Der IVS sieht dafür insgesamt 8 Teleskope (4 pro Hemisphäre) vor.

Im Planungszeitraum wird auch das SOS-W in den routinemäßigen Betrieb überführt und im ILRS etabliert. SOS-W wird dabei vornehmlich für tieferfliegende Satelliten eingesetzt, während das WLRS für höherfliegende Satelliten – inklusive dem Mond – genutzt werden soll. Zentral ist die Schaffung der Möglichkeit des gemeinsamen Betriebs der beiden SLR-Teleskope (s. Objective 4).

3. Messung von Laserdistanzen zum Mond

Mit der Inbetriebnahme des SOS-W zur Vermessung tieffliegender Satelliten soll das WLRS wieder zur Beobachtung von Laserdistanzen zum Mond genutzt werden. Das Instrument wurde in den vergangenen Jahren generalüberholt und mit einem neuen Laser ausgestattet. Um die erforderliche Laserleistung zu steigern kann das neue Lasersystem zumindest Doppelpulse abstrahlen, so dass Korrelationstechniken für die Signaldetektion eingesetzt werden können, die auch bei einem Signal- Rauschverhältnis in der Nähe von 1 noch eine eindeutige Trefferanalyse zulassen. Die Berechnungen der Bahnprädiktionen wurden auf den neusten Stand gebracht und mit den entsprechenden Berechnungen der LLR Stationen Grasse und McDonald verifiziert. An der Integration eines geeigneten lokalen Montierungsmodells für die korrekte Pointierung des WLRS Teleskops auf die Mondreflektorziele wird zurzeit gearbeitet.

4. Aufbau und Betrieb eines DORIS-Systems am GO Wettzell

Um volle GGOS-Konformität des Geodätischen Observatoriums Wettzell zu erreichen, soll am Observatorium ein DORIS-System aufgebaut und betrieben werden. Zur Auswahl des Standorts müssen RFI-Tests durch-



Abbildung 3-12: Skyline des Geodätischen Observatoriums Wettzell

geführt werden, um Radiointerferenzen mit den VLBI-Messungen zu minimieren. Das DORIS-System soll in das lokale Vermessungsnetz eingebunden werden.

5. *Permanente Vermessung der Referenzpunkte*

Die Verknüpfungsvektoren zwischen den Instrumenten der verschiedenen raumgeodätischen Techniken sind zentral für die konsistente Kombination der Verfahren. Strategien zur Häufigkeit der lokalen Vermessung der Referenzpunkte und des Einsatzes neuartiger Technologien sollen entwickelt und eingesetzt werden (s. auch Schwerpunkt 1, Objective 1).

Objective 2 Aktive Beteiligung in den Diensten der IAG

Neben dem Beitrag von hochwertigen Beobachtungszeitreihen wird die FGS auch aktiv in den internationalen wissenschaftlichen Diensten, Kommissionen, Projekten und geodätischen Infrastrukturaufgaben der IAG und GGOS mitarbeiten und mitgestalten.

1. *Anstreben von Schlüsselpositionen in den wissenschaftlichen Diensten der IAG*

Die FGS hat den Anspruch, wissenschaftliche und organisatorische Weiterentwicklung der IAG und GGOS entscheidend mitzugestalten. Dazu sollen auch im Programmzeitraum 2016-2020 Schlüsselpositionen in der IAG, GGOS und den wissenschaftlichen Diensten angestrebt werden.

2. *Beitrag zur Festlegung, Implementierung und Einhaltung von Standards*

Die FGS engagiert sich maßgeblich bei der Festlegung, Implementierung und Einhaltung von Standards und Konventionen innerhalb von GGOS durch Leitung und Betrieb des GGOS Bureau for Products and Standards (BPS), s. Objective 3.

3. *Beteiligung an Projekten der IAG und von GGOS*

Die FGS wird sich im Programmzeitraum angemessen an Projekten der IAG und GGOS beteiligen. Beispielhaft seien hier erwähnt:

- die GGOS Arbeitsgruppe PLATO (Performance Simulations and Architectural Trade-Offs), welches die optimale Architektur eines GGOS mit Simulationen untersucht;
- die ILRS Arbeitsgruppe LARGE (LAser Ranging to GNSS s/c Experiment), welche Strategien zur SLR-Beobachtung aller GNSS Satelliten und zur kombinierten Datenanalyse entwickelt;
- das IGS Projekt MGEX (Multi-GNSS Experiment), welches eine Pionierrolle zur Gewinnung und Nutzung von Trackingdaten der neuen GNSS spielt; der IGS Real-Time Service, welcher Echtzeit-GNSS-Daten und -Produkte für wissenschaftliche und weitere Anwendungen zur Verfügung stellt.

4. *Beteiligung an geodätischen Infrastrukturaufgaben*

Die FGS beteiligt sich angemessen an geodätischen Infrastrukturaufgaben wie der Mitarbeit in IAG Kommissionen, der Leitung des IERS Central Bureaus und des GGOS Bureaus of Products and Standards, des Betriebs des GGOS Portals, des European Data Centers (EDC) des ILRS, von Analysezentren und Kombinationszentren der wissenschaftlichen Services.

Objective 3 Standardisierung für einen konsistenten Raumbezug

Die Verwendung einheitlicher Standards und Konventionen ist eine grundlegende Voraussetzung für die Erzeugung konsistenter geodätischer Ergebnisse. Dies betrifft die gesamte Verarbeitungskette: Messsysteme und -verfahren, Datengewinnung, Modellentwicklung, Datenanaly-

se, kombinierte Parameterschätzung und Bereitstellung von Produkten. Innerhalb der FGS wird das gesamte Spektrum geodätischer Raumbeobachtungen bearbeitet, und die kombinierte Parameterschätzung sowie die Integration von geometrischen und gravimetrischen Größen bilden Schwerpunkte der Arbeiten. Deshalb ist die Standardisierung eine übergeordnete Zielsetzung im Forschungsprogramm der FGS, um die Grundlage für einen einheitlichen integrierten Raumbezug zu schaffen.

1. Betrieb des GGOS Büros für Produkte und Standards

Innerhalb von GGOS wurde 2009 das Büro für Standards und Konventionen eingerichtet (s. Abbildung 3-13), welches im Zuge der im letzten Jahr durchgeführten GGOS Reorganisation in das Büro für Produkte und Standards transferiert wurde. Das Büro wird gemeinsam vom Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut, dem Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie und der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der Technischen Universität München im Rahmen der FGS betrieben. Ein wichtiges Ziel dieses Büros ist es, die Verwendung einheitlicher Standards und Konventionen bei allen IAG Komponenten einschließlich der wissenschaftlichen Dienste und deren Analysezentren sicherzustellen, als grundlegende Voraussetzung für die Erzeugung konsistenter IAG/GGOS Produkte. Die in diesem Büro durchgeführten Arbeiten liefern auch eine unmittelbare Grundlage für die Aufgaben und Ziele der FGS.

2. Evaluierung der Standards und Konventionen

Das GGOS Büro für Produkte und Standards hat eine Bestandsaufnahme der in der IAG verwendeten Standards und Konventionen vorge-

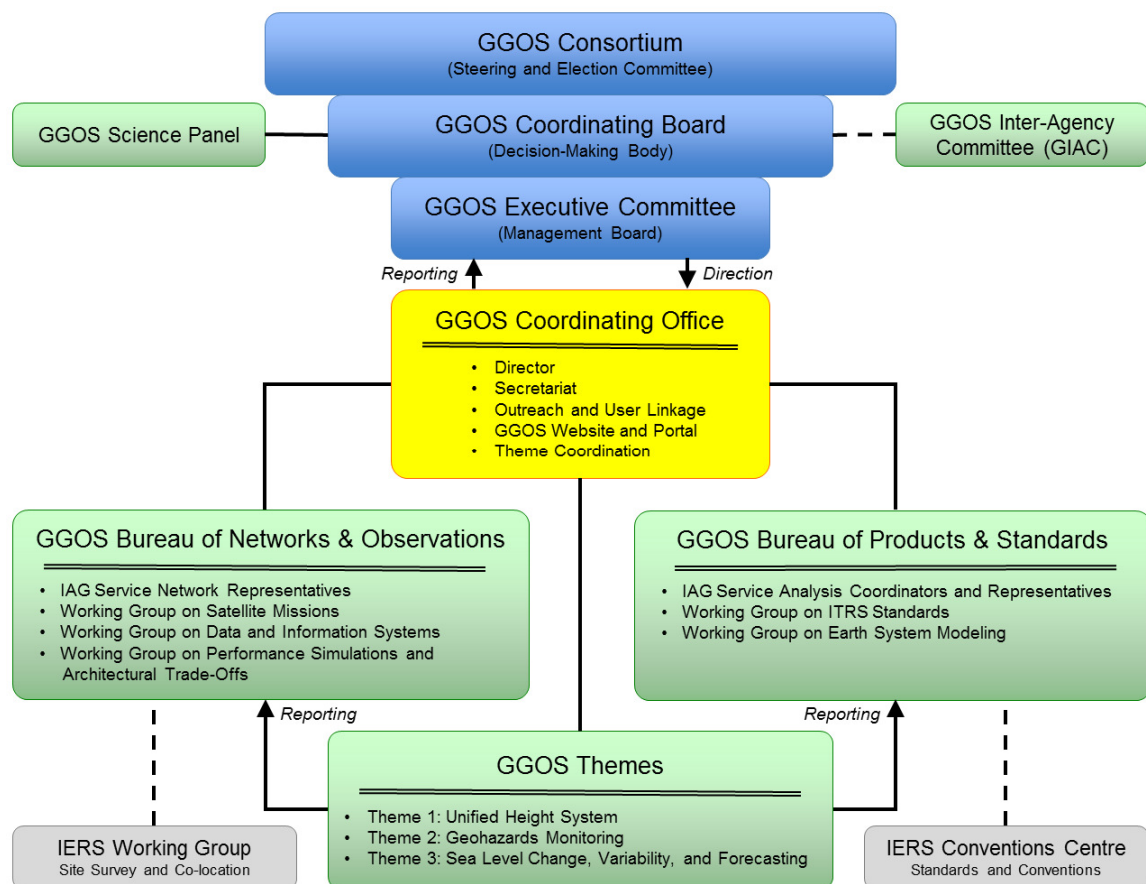


Abbildung 3-13: Neue Struktur von GGOS. Das Bureau of Products and Standards wird im Rahmen der FGS betrieben

nommen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in einem 80-seitigen Dokument mit dem Titel „GGOS Bureau of Products and Standards: Inventory of standards and conventions used for the generation of IAG/GGOS products“ zusammengestellt, welches sich gegenwärtig in einem externen Review-Verfahren befindet. Die überarbeitete Version dieses Dokuments soll im IAG Geodesist's Handbook 2016 veröffentlicht sowie auf der GGOS Webseite zugänglich gemacht werden, wobei diese online-Version in regelmäßigen Abständen aufdatiert werden soll. Die vorgenommene Bestandsaufnahme macht deutlich, dass gegenwärtig verschiedene Standards und Konventionen für die Auswertung der verschiedenen Beobachtungsverfahren verwendet werden, zudem sind unterschiedliche numerische Konstanten, Zeit- und Gezeitsysteme in Gebrauch. Dadurch wird z.B. eine kombinierte Schätzung von geometrischen und gravimetrischen Größen erheblich erschwert und ein konsistenter Raumbezug der geodätischen Produkte ist nicht gewährleistet. Wichtige zukünftige Arbeiten bestehen darin, die gegenwärtigen Inkonsistenzen bezüglich der verwendeten Standards und Konventionen im Detail zu studieren und in Zusammenarbeit mit den beteiligten Organisationen und Diensten die notwendigen Schritte einzuleiten, um die vorhandenen Defizite zu beseitigen. Es wurden Vertreter von den wissenschaftlichen Diensten benannt und als Repräsentanten in das Büro integriert, um eine internationale Koordination der Arbeiten zu erreichen.

3. Vereinheitlichung der Standards als Grundlage für konsistente IAG/GGOS-Produkte

Das GGOS Bureau hat einige wichtige geodätische Produkte und Themenbereiche bezüglich der verwendeten Standards und Konventionen beleuchtet: zälestisches und terrestrisches Referenzsystem, Erdorientierungsparameter, GNSS-Bahnen, Schwerefeld und Geoid sowie Höhensysteme. Da die FGS maßgeblich an der Berechnung der genannten Produkte und den dafür notwendigen Forschungsarbeiten beteiligt ist, liefert die durchgeführte Bestandsaufnahme auch für die Umsetzung der FGS Ziele eine wichtige Grundlage. In dem zuvor genannten Dokument wurden einige Defizite aufgezeigt und Empfehlungen formuliert, wie die Konsistenz der geodätischen Produkte verbessert werden kann. In Zusammenarbeit mit den Vertretern der IAG Dienste sollen gezielte Maßnahmen erarbeitet und die notwendigen Schritte umgesetzt werden, um eine Vereinheitlichung der verwendeten Standards zu erreichen und die Konsistenz der geodätischen Produkte zu verbessern. Es ist auch eine genaue Beschreibung der geodätischen Produkte einschließlich der verwendeten Standards erforderlich, damit für die Nutzer der eindeutige Bezug der Ergebnisse gegeben ist.

Objective 4 Automatisierung

Die zusätzlichen Grossgeräte und die entsprechend geplante Steigerung der VLBI- und SLR-Datengewinnung bei gleichem oder reduziertem Personaleinsatz erfordert eine Steigerung der Fernsteuerbarkeit und des Automatisierungsgrades der Messsysteme am Observatorium und der Datenanalyse. Dies bedingt als erste Schritte eine Fernbedienbarkeit aller VLBI-Komponenten und einen gemeinsamen Beobachtungsbetrieb von WLRS und SOS-W mit dem mittelfristigen Ziel, alle Instrumente von einem Kontrollstand aus zu bedienen. In den letzten Jahren wurde die Informationstechnologie an die neuen Bedingungen von Fernsteuerung und Automatisierung angepasst. Dazu wurde das Konzept der Netzwerk-Enklaven, also von architektonisch separaten Netzbereichen, konsequent für alle Messsysteme des GOW umgesetzt. Entsprechende, verschlüsselte SSH-Tunnel erlauben den sicheren Zugang zu diesen Sicherheitszonen für die Steuerung. Der Hauptfokus lag hier im Bereich VLBI, da diese Technik prädestiniert für weltweit automatische Abläufe ist. Die entwickelte Software e-RemoteCtrl wird mittlerweile auch in anderen Stationen und Netzen eingesetzt. So kann man mit ihr die Antennen des

AuScope-Netzes in Australien über tausende Kilometer von einem Kontrollraum aus fernsteuern. Ähnlich dazu können auch alle Radioteleskope des Observatoriums, einschließlich von O'Higgins und TIGO, sowohl vom alten Kontrollraum der 20m Antenne als auch vom neuen Kontrollraum aus, aber auch von bestimmten PCs im und außerhalb des Observatoriums mit gezielten Nutzerrollen bedient werden. Diese Technik wurde im Rahmen des FP7-Projekts „Novel EXplorations Pushing Robust e-VLBI Services (NEXPreS)“ für den EVN entwickelt.

1. *Ausbau der Digitaltechnik zur Datenübertragung und Speicherung*

Ein Problem ist aktuell noch die flexible Übertragung der Daten an beliebige Speichersysteme des Observatoriums, so dass die aufgezeichneten Daten immer in dem Kontrollzentrum ankommen, wo auch der Beobachter arbeitet bzw. von wo sie zu den Korrelatoren versandt werden können. Dies ist zum einen durch Übertragungsgrenzen limitiert. Zum anderen sind aktuelle Steuersysteme, wie das NASA Field System oder die Mark5-Rekorder-Software, nicht in der Lage, solche flexiblen Datenströme zu bedienen und zu steuern. Deshalb sollen diese Mechanismen entsprechend nutzbar entwickelt werden. Es bedarf zudem eines weiteren Ausbaus der Digitaltechnik, wie Digital Baseband Converter mit integrierten, schnellen Glasfaserausgängen und von wartungsarmen Empfangstechniken, so dass ein Beobachter direkt beim Teleskop nicht mehr zwingend erforderlich ist.

2. *Integration von Zusatzsensorik zur Gewährleistung der Sicherheit*

Eine weitere, nötige Entwicklung ist eine individuelle Gefährdungsbeurteilung der automatisch gesteuerten Systeme und der damit verbundene Ausbau von Zusatzsensoren zur Gewährleistung der Sicherheit. Während für die Radioteleskope Erweiterungen der Antennensteuerung zur Einhaltung z.B. von Sicherheitszonen und weitere Messgeräte, wie z.B. Windsensoren, zum automatischen Schutz vor Windböen ausreichen, bedarf es bei den SLR-Systemen einer wesentlich umfassenderen Herangehensweise, um einen gemeinsamen Betrieb der beiden SLR-Stationen zu erreichen.

3. *Aufbau eines gemeinsamen Beobachtungsbetriebs von WLRS und SOS-W*

Neben einem weiteren und stringenteren Ausbau der sicherheitsrelevanten Überprüfung von Software- und Hardwarekomponenten sind vor allem kombinierte und regelmäßig kontrollierte Überwachungssysteme des Luftraums für die aktiven Sendeteleskope von entscheidender Bedeutung. Als verkettete Maschinen sind die Teleskope zahlreichen sicherheitsrelevanten Fragestellungen unterworfen, die mittels entsprechenden Personals bewertet und eingeschätzt werden müssen, um sowohl Menschen im Nah-, Mittel-, und Fernfeld als auch die Maschine an sich zu schützen. Dies kann aus heutiger Sicht nur durch verkettete Sicherheitssysteme, wie z.B. aktiver Lidar/Radar-Technik in Kombination mit Daten der Flugsicherung, erreicht werden. Zudem ist der Ausbau der automatischen Ablaufsteuerung noch extrem zu erhöhen. Während die aktuelle Software SLR 2.0 semi-automatische Abläufe, wie z.B. das suchende Scannen entlang einer Satellitenbahn, ermöglicht, sind wichtige Anteile, wie z.B. die Auswahl eines nächsten Satelliten, Qualitätsüberwachungen während einer Passage und Entscheidungen zum Abbruch und Anfahren einer neuen Bahn noch nicht zur Genüge umgesetzt. Ziel ist der Aufbau einer Autonomen Produktionszelle, die sich adaptiv an neue Anforderungen und Aufträge anpasst bzw. anpassen lässt. Die dazu nötigen Arbeitseinheiten sind im Bereich von SLR wesentlich von kürzeren Intervallen geprägt, da spontaner auf Satellitenpassagen und aktuelle Beobachtungsbedingungen, wie z.B. Wolkenbedeckungen, reagiert werden muss. Im Bereich der VLBI-Teleskope sind diese Abläufe bereits jetzt durch die

internationalen Schedules festgelegt, so dass sich die Erweiterungen auf die Automatisierung und Qualitätskontrolle des Vorbereitens, Aufsetzens, Durchführens und Abschließens eines kompletten Ablaufplans beschränken und damit bereits auf einer wesentlich höheren Ebene angesiedelt sind.

4. *Nutzung von Agenten-Systemen zur autonomen Ablaufplanung und -steuerung*

Aus diesem Grund ist VLBI auch für eine Machbarkeitsstudie prädestiniert, die Software-Agentensysteme zur Kontrolle und Automatisierung eines auftragsbasierten Ablaufs einsetzen. Diese Agenten erfassen übergeordnete Parameter aus dem Ablaufgeschehen, bewerten diese anhand einer Bewertungsmetrik, welche gezielt Entscheidungen forciert und leiten daraus Aktionen für die nächsten, generellen Handlungen ab. Somit könnte mittels dieser Agenten eine automatische Bewertung von externen Beobachtungsanfragen oder ein dynamisches Ändern von Abläufen ermöglicht werden, was GGOS wesentlich anpassungsfähiger gestaltet. So könnten sehr weit entfernte Stationen, wie z.B. O'Higgins in der Antarktis, stärker und wesentlich dynamischer in die Beobachtungspläne eingebunden werden. Zudem dienen diese Ansätze auch weltweiten Kontrollaufgaben, wie sie aktuell bei AuScope in Australien oder teilweise in Wettzell propagiert werden, dass nämlich die Kontrolle ganzer Netze von Teleskopen zeitweise von verschiedenen, weltweiten Zentren übernommen wird (z.B. immer von Zentren, bei denen es aktuell Tag ist), was die Beobachtungslast in einzelnen Observatorien wesentlich verringern könnte.

Objective 5 Weiterentwicklung der geodätischen VLBI im Rahmen von VGOS

Das Observatorium Wettzell bietet durch seine mittlerweile drei Radioteleskope eine einzigartige Infrastruktur für geodätische und astrometrische Messprogramme. Zudem können die Instrumente für spezielle Experimente eingesetzt werden, z.B. in der Weltraumfahrt (Tracking von Raumfahrzeugen auf Planeten etc., wie mit dem chinesischen Mondlander Chang'E3 gezeigt) oder für astronomische Aufgaben (Messung der Fluktuationen des Sonnenwindes). Neben dem Ausbau der Steuerung und Datengewinnung aller drei Teleskope als Array ist vor allem die Erweiterung des mittlerweile runderneuterten 20m RTW für zukünftige Anforderungen entscheidend (s. auch Schwerpunkt 1, Objective 2).

1. *Nachrüstung des 20 m Teleskops*

Das 20m RTW nimmt aktuell jährlich mit 3500 bis 4000 Betriebsstunden an den internationalen Beobachtungen des IVS teil. Mit der Inbetriebnahme der Twin-Teleskope kann das 20m RTW vermehrt für Spezialaufgaben und Experimente eingesetzt werden. Zur Steigerung der Leistung soll die Möglichkeit des Einsatzes eines zweiten oder kombinierten Dewars für linkszirkularpolarisierte Signale untersucht werden. Zur Erweiterung der Messbandbreite soll der Einsatz von breitbandigeren Feedhörnern, z.B. als Rillenhorn für den X-Band-Empfang (z.B. von 5 bis 10 GHz) geplant werden. Untersuchungen zur Nutzung von echten Breitbandtechniken können in Form von Projektstudien auch für andere Teleskope wichtige Informationen liefern.

2. *Erhalt und Ausbau der VLBI-Station O'Higgins*

Ähnliches gilt auch für die anderen Systeme, die von Wettzell aus betreut werden (TIGO und O'Higgins). Hierbei kommt besonders O'Higgins eine zunehmende Bedeutung zu, da es voraussichtlich bald das einzige geodätische Radioteleskop in der Antarktis sein wird. O'Higgins nimmt wegen seiner schlechten Zugänglichkeit und entfernten Lage eine besondere Rolle ein, was Wartung und Personaleinsatz betrifft. Deshalb liegt das höchste Augenmerk auf dem Einsatz von wartungsarmen Techniken

(z.B. langzeitstabiles Kryosystemen, Dewar) und einer verstärkten Nutzung von Digitaltechniken, wie digitalen Basisbandkonvertern oder neuen, schnellen Aufzeichnungssystemen, wie Mark6 oder FlexBuf. Eine Untersuchung möglicher Breitbandnutzungen sollte wie für das 20m RTW angestrebt werden. Zudem ist der Ausbau der Möglichkeiten einer dynamischen Beobachtungsplanung zusammen mit dem DLR zur Erhöhung von VLBI-Beobachtung über das gesamte Jahr hinweg wichtig. Dazu ist es notwendig, VLBI-Ablaufpläne kurzfristig (innerhalb einer Woche bis einem Tag) an gegebene Zeitpläne für Satellitenpassagen anzupassen. Die Einbindung der vor Ort tätigen Servicefirma kann hier in Absprache mit dem DLR zusätzlich zur Verbesserung der Wartung der VLBI-Komponenten und damit zu höherer Stabilität über das gesamte Jahr hinweg dienen. In diesem Zusammenhang ist die gesamte Wartung und Instandhaltung von Mechanik, VLBI-Technik, aber auch von Beobachter-räumen und -containern eine wichtige Investition für die Zukunft der Station.

3. *Twin Combined Element Interferometer*

Weitere Verbesserungen ermöglichen die Ausweitung der Nutzung eines gemeinsamen Masers, so wie aktuell schon für das Twin Teleskop im Einsatz, auf alle drei Teleskope. Damit kann ein phasengekoppeltes Combined Element Interferometer für Satellitenbeobachtungen und weitere geodätische Fragestellungen aufgebaut werden. Desweiteren ermöglicht der Aufbau die Nutzung als VLBI-Array für Quasarmessungen und erlaubt lokale Beobachtungen mit gesteigerter Qualität der Uhrenparameter und damit erweiterte Qualitätskontrollen der lokalen Geometrie.

4. *Lokale Korrelation der Daten des Radioteleskop-Arrays in Wettzell*

Für solche Versuche ist aber auch der Ausbau von lokalen Korrelationskapazitäten nötig. Speziell zur Fehleranalyse im Post-Processing ist ein lokaler Korrelator nützlich. Daneben können bei entsprechendem Rechenaufwand und geeignetem Personaleinsatz auch lokale, eigene Experimente geplant, durchgeführt, korreliert und ausgewertet werden. Besonders interessant ist dies für Ko-Lokations-Experimente zu Satelliten (z.B. spezielle X-Band-Satelliten oder auch die Satelliten der GNSS mit speziellen L-Band-Empfängern, wie testweise schon mit dem 20m RTW gezeigt), da dabei sofort vor Ort Ergebnisse zwischen verschiedenen Techniken auf dem Observatorium produziert werden können.



Abbildung 3-14: 9m Radioteleskop in O'Higgins

5. Reduzierung der Übertragungszeiten zum Korrelator

Parallel dazu ist der Ausbau des Internetanschlusses von entscheidender Bedeutung, da in Zukunft pro Twin-Teleskop mehrere Terabyte an Daten pro Tag aufgezeichnet werden. Um diese Daten zeitnah an die Korrelatoren übertragen zu können, sind Konzepte mit Bandwidth-On-Demand, wie beim EVN diskutiert, zu prüfen und zu unterstützen. Ein Ausbau auf 10 Gbit/s in Wettzell, aber auch eine umfangreiche Erweiterung der Kapazitäten am deutschen Korrelator in Bonn sind zu fördern. Vor Ort in Wettzell muss dies zudem mit einem Ausbau von neuen, schnellen, 10Gbit/s-aufzeichnenden RAID-Systemen einhergehen, die dann dynamisch von den Teleskopen der Station mit Daten beschickt werden können, während das Experiment läuft und anschließend parallel die Daten an die Korrelatoren übertragen. Live-Streams etc. werden in diesem Zusammenhang ebenfalls möglich und sollen die Zeiten zwischen Datengewinnung und fertigem Produkt wesentlich verkürzen. Entscheidend dafür ist aber eine erhebliche Steigerung der Automatisierung der Beobachtungsabläufe und Aufzeichnungsmechanismen. Als Alternative zu den Internetübertragungen können kleine, leicht transportierbare und wirtschaftliche Festplatten mit großem Speichervolumen (z.B. 2TB und mehr) angesehen werden, die dann einfach per Kurier versandt werden. Diese Lösung wird in jedem Fall parallel zur Internetübertragung aufgebaut werden müssen.

6. Mitarbeit im IVS zur möglichen Etablierung von regelmäßigen Ka-Band-Beobachtungen

Im Zusammenhang mit der Untersuchung von möglichen Breitbandtechniken für die Radioteleskope des Observatoriums spielt auch die mögliche Nutzung von höheren Frequenzen eine interessante Rolle. In diesem Zusammenhang ist es vorteilhaft, im IVS auch Ka-Band-Beobachtungen zu etablieren bzw. Studien dazu zu fördern, da hier die Struktur der genutzten Radioquellen optimal ist, auch wenn man verstärkt an atmosphärischen Einflüssen leidet. Es ist geplant, an entsprechenden Beobachtungsprogrammen des IVS aktiv beizutragen.

Objective 6 Einheitliche Zeitbasis an den geodätischen Observatorien

Zur Realisierung der Stationszeit betreibt das Geodätische Observatorium Wettzell ein Zeitsystem, welches aus fünf Cäsiumuhren und drei Wasserstoffmasern besteht. Über einen GPS-Zeitempfänger wird das Zeitsystem ans Netz der internationalen Zeitlabore angeschlossen und trägt zur koordinierten Weltzeit UTC bei. Die aktiv „Delay“-kompensierte glasfaserbasierte Anbindung aller Messsysteme an das Zeitsystem des Observatoriums wird gegenwärtig realisiert. Im Rahmen dieser Neuordnung der Zeitverteilung wird die Möglichkeit geschaffen, alle geodätischen Beobachtungstechniken auf der gleichen Zeitskala zu betreiben. Die Unsicherheit des Uhrenstands an den Messsystemen wird dann durch eine aktive Rückkoppelung auf ± 1 ps bezogen auf die von UTC-Wettzell abgeleiteten PPS Pulse konstant gehalten, wobei der Versatz der Phase zwischen Master-Clock und jedem der Messsysteme dann fortlaufend protokolliert und a posteriori korrigiert wird. Die auf dem Observatorium befindlichen Cs-Normale und Wasserstoffmaser lassen sich prinzipiell zu einer „Composite Clock“ zusammenführen, die im Rahmen der technischen Leistungsfähigkeit der beiden Uhrentypen zu einer sowohl im Langzeitbereich, wie auch im Kurzzeitbereich stabilen Zeit- und Frequenzbasis (Interpolator) synthetisiert werden.

Diese universale Zeitbasis aller Messsysteme erlaubt die Ko-Lokation der Systeme über die Uhrenparameter. Die durch innovative Entwicklungen bei der Zeit- und Frequenzübertragungstechniken möglich werdende präzisen Synchronisation der Zeitsysteme von GGOS-Observatorien wird es erlauben, die Zeitmessung als zusätzliche geodätische Observable zu

nutzen. Mittelfristig werden diese Synchronisationstechniken zusammen mit der Realisierung hochstabiler Uhren zu einem globalen Netz synchronisierter Uhren führen und relativistische Geodäsie ermöglichen. In diesem Kontext wird die Zeithaltung eine geodätische Aufgabe werden. Geodätische Observatorien entwickeln sich zu Zeitlabors und Zeitlabors werden zu geodätischen Observatorien. Auf dem Weg dorthin stellen sich der FGS mehrere Aufgaben.

1. Beitrag des Geodätischen Observatoriums Wettzell zur internationalen Atomzeit

Mit seinem Zeitlabor trägt das Geodätische Observatorium Wettzell bereits heute einen signifikanten Beitrag zur koordinierten Weltzeit UTC bei. Im Januar 2015 betrug der Beitrag zu UTC 1.36%, womit das GOW (am BIPM noch unter dem Namen IfAG geführt) an 16-ter Stelle der 60 internationalen Zeitlabors steht. Der Beitrag des Observatoriums zu UTC und die Beteiligung an der internationalen Zeithaltung sollen weitergeführt werden.

2. Verknüpfung der Messsysteme über geometrisches Referenzziel

Mit der Realisierung einer einheitlichen Zeitbasis aller Messsysteme des Observatoriums wird die Schaffung eines gemeinsamen von allen Systemen nutzbaren geometrischen Referenzzieles ermöglicht. Ein solcher Referenzpunkt erlaubt neben Ko-Lokationsmessungen zwischen den Techniken VLBI, SLR und GNSS einen geschlossenen Intertechnik-Ringvergleich durch Verknüpfung der Referenzpunkte der Instrumente in Raum und Zeit. Im Rahmen der Forschergruppe FOR 1503 der DFG wird das Potenzial dieses Ansatzes für das GO-Wettzell im Rahmen des Projekts P7 untersucht (s. auch Schwerpunkt 1, Objective 4).

3. Nutzung optischer Resonatoren höchster Güte

Der Ringlaser „G“ stellt einen sehr stabilen optischen Resonator mit extrem hoher Güte, d.h., extrem geringer Linienbreite dar, der gegenwärtig im Rahmen des Projektes OCTAGON2 (Optical Clock Technologies and their Applications for Globally Optimized Navigation) detailliert charakterisiert wird. Die Resultate werden zeigen, inwieweit sich der Ringlaser als optischer Maser als Referenz für die VLBI eignet. Parallel dazu soll das Konzept stabiler optischer Referenz-Cavities validiert und mit dem Ringlaser verglichen und nach Möglichkeit kombiniert werden. Stabile optische Resonatoren ermöglichen eine höchste Frequenzstabilität für kurze Integrationszeiten ($df/f < 5 \cdot 10^{-16}$ bei 1 s Integrationszeit), welche für die VLBI genutzt werden soll (s. auch Schwerpunkt 1, Objective 7).

4. Zeitübertragung mit SLR

Während Mikrowellenverfahren Frequenzen mit hoher Präzision übertragen können, erlauben Laserpulse die Übertragung von Zeit durch Nutzung des Konzepts der Einstein-Synchronisation. Kombinierte Zwei-Wege Pulslaufzeitmessungen und aktive Detektion an einem Satelliten mit einer stabilen Uhr können den fehlenden Bezug zur Phase selbst auf interkontinentalen Distanzen herstellen. Die FGS beteiligt sich federführend am ESA-Projekt European Laser Time Transfer (ELT) zur Zeitübertragung mit ultrakurzen Laserpulsen vom WLRs zur Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) Uhr, welche 2016 zur Internationalen Raumstation ISS gebracht werden soll. Im Rahmen der FGS werden die internationalen Laser-Beobachtungskampagnen koordiniert und wird das Experiment zur Validierung des Konzeptes wissenschaftlich.

5. Anschluss des an das Glasfasernetz an eine optische Referenzuhr bei der PTB

Mit den Wasserstoffmasern (bzw. im Regelfall mit der Composite Clock) verfügt das Geodätische Observatorium Wettzell über hochwertige Interpolatoren für die Zeitunterteilung, um die Messsysteme geeignet zu

betreiben. Für eine zukünftige „relativistische Geodäsie“ werden die Anforderungen deutlich höher sein. Daher soll die Möglichkeit zur Schaffung einer kompensierten Glasfaseranbindung zwischen einer künftigen (hochverfügbaren) optischen Uhr an der PTB und dem Observatorium untersucht werden. Im Rahmen der momentan europaweit rasant laufenden Entwicklung der fasergebundenen verlustfreien Frequenzübertragungstechnik ist zu erwarten, dass noch innerhalb der nächsten 5 Jahre ein gemeinsamer regelmäßiger Uhrenvergleich zwischen den drei bedeutendsten europäischen Zeitlaboren, namentlich der PTB, SYRTE und NPL möglich und zum Routineprozess wird. Durch optische satellitengestützte Zeitverteilung, wie mit dem ELT-Projekt, kann Wettzell hier durch Herstellung des Bezugs zur Phase einen bedeutenden Beitrag leisten durch Herstellung des Bezugs zur Phase. Durch Kombination von fasergestützter Frequenzübertragung und Laser-Zeitübertragung über interkontinentale Distanzen kann ein großmaßstäbiger Raum-Zeit-Bezug hergestellt werden.

Objective 7 Erweiterung des Sensornetzwerks um Wettzell

Die in Schwerpunkt 2 „Monitoring geophysikalischer Prozesse“, Objective 1 beschriebenen Weiterentwicklungen zur besseren Erfassung der atmosphärischen Refraktion können ohne infrastrukturelle Maßnahmen nicht umgesetzt werden. In der näheren und zwischenzeitlich auch weiter gefassten Umgebung von Wettzell existiert jedoch bereits ein GNSS-Footprint-Netzwerk. Der gegenwärtige Zweck besteht im Nachweis der lokalen und regionalen Stabilität. Dieses Netzwerk wird stufenweise erweitert und zu einem Mehrzweck-Netzwerk für das Deformations-Monitoring sowie als Atmosphären-Sensornetz ausgebaut.

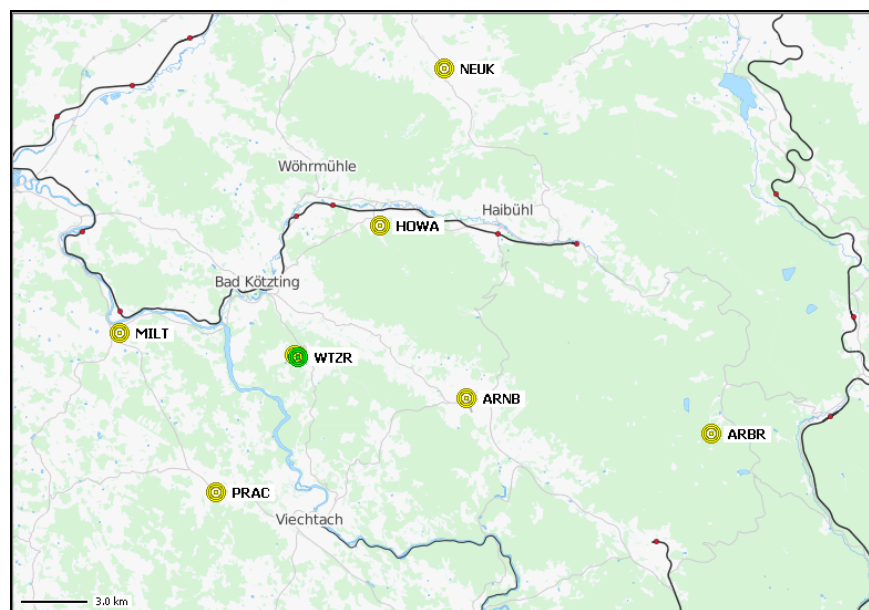


Abbildung 3-15: Kartendarstellung des inneren Footprint-Netzwerkes um Wettzell (NEUK: SAPOS-Station, alle anderen Stationen werden vom Observatorium selbst betrieben)

1. Footprint-Netz als Mehrzweck-Netzwerk für Deformation und Atmosphärenmonitoring

Zusammen mit den SAPOS-Stationen wird gegenwärtig eine horizontale Abdeckung mit einem Radius von 80 km erreicht. Die horizontale Auflösung des Sensornetzes ist ein Aspekt, der für die Erfassung des Atmosphärenzustands und die Assimilation bzw. Interpolation in ein Modellgitter von Bedeutung ist. Allerdings zeigen sich unter gewöhnlichen Wetterbedingungen horizontale Korrelationslängen des Wasserdampfgehaltes

von mehreren hundert Kilometern. Zentral für die Erfassung der Wasserdampfverteilung ist eine gute Vertikalauflösung des Netzwerks, da die feuchte Komponente der Laufzeitverzögerung im exponentiellen Abnahmeverhalten eine Skalierungshöhe von lediglich 2 km aufweist. Dies charakterisiert eine sehr hohe Abnahmerate, sehr viel höher als im Vergleich zum Luftdruck von ca. 8 km. Für die Anwendung als Atmosphären-Sensornetz besteht nunmehr somit zunächst die Aufgabe in der sukzessiven Erweiterung im lokalen Umfeld, aber mit einem Fokus auf eine Steigerung der Vertikalauflösung. Die Erweiterungsstationen sollen horizontal nahe an Wetzell liegen, in der Höhe aber eine möglichst große Spannweite abdecken, wodurch vertikale Reduktionskoeffizienten genauer als bisher bestimmt werden können. Dabei sind Wirtschaftlichkeitserwägungen zu berücksichtigen. Möglichkeiten für höhenmäßig niedriger gelegene als auch höher gelegene Stationen sind jedoch gegeben.

Die gegenwärtig betriebene Station am Großen Arber erfüllt die Kriterien für eine hochgelegene Station. Die Datenqualität ist im Vergleich zu den anderen Footprint-Stationen jedoch schlechter, da die Station unter einer Radarkuppel der Bundeswehr betrieben wird. Auch ist die horizontale Entfernung zu Wetzell mit fast 20 km schon vergleichsweise groß. Hier sollte das Limit bei 10 km gezogen werden.

2. Integration ergänzender Sensorik

Zur Trennbarkeit der per GNSS bestimmten neutralen Laufzeitverzögerungen in eine hydrostatische und eine feuchte Komponente bedarf es Luftdruckmessungen. Ferner wird zur Umwandlung der feuchten Laufzeitverzögerung in den integrierten Wasserdampfgehalt die gewichtete mittlere Troposphären-Temperatur benötigt. Diese kann auch über Regressionsformeln aus Oberflächen-Temperaturen in guter Näherung bestimmt werden. Boden-meteorologische Messungen müssen somit für ausgewählte Stationen vorliegen. Ein Kalibrierkonzept zur regelmäßigen Prüfung der Sensoren wird aufgestellt.

Profilmessungen der Refraktivität sollen über Wetzell in Form von Radiosonden-Aufstiegen nach einem Prioritätenplan durchgeführt werden. Diese Messungen haben insbesondere für die Modellverifikation hohe Bedeutung. Daten über die Wolkenbedeckung und möglichst auch die Wolkenmächtigkeit und mittlere Wolkenhöhe sind auch für zukünftige VLBI-Messungen im Ka-Band, wie sie vom Twin-Teleskop TTW1 unterstützt werden, von Bedeutung.

Objective 8 Sicherung von Nachhaltigkeit und Stabilität des GREF-Stationsnetzes und Qualität der Beobachtungsdaten

Das BKG betreibt mit seinem GREF-Stationsnetz eine zentrale, nationale GNSS-Infrastruktur. Auf der Grundlage der Daten dieses Stationsnetzes werden Anwendungen und Dienste mit einem hohen Innovationspotential sowohl im Bereich der Echtzeitpositionierung und Navigation als auch im Bereich der Generierung, Laufendhaltung und Überwachung des dreidimensionalen Raumbezuges unterstützt. Durch die Kombination der GNSS-Messungen mit den Beobachtungen weiterer Messverfahren (z.B. Nivellement, Schwere oder Pegeln), stellen die GREF-Stationen wichtige Ausgangsdaten für die Realisierung des integrierten geometrisch-physikalischen Raumbezugs bereit. Für diese Aufgaben müssen die Stationen des GREF-Netzes kontinuierlich und unterbrechungsfrei betrieben werden und die sekundlich generierten Daten in Echtzeit 24 Stunden am Tag / 7 Tage in der Woche bereitgestellt werden.

Die Daten von etwa der Hälfte der GREF-Stationen sind in die Auswertungen der internationalen Netze von IGS und EUREF eingebunden. Die Funktionsfähigkeit und die Weiterentwicklung des GREF-Stationsnetzes

sowie der ausländischen GNSS-Referenzstationen des BKG, wie TIGO/AGGO, O'Higgins, HOFN, REYK und LHAZ, sind somit auch von internationaler Bedeutung.

Nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung der derzeit aus den Daten abgeleiteten und bereitgestellten Produkte ist in den nächsten Jahren keine Reduktion der Anzahl der GREF-Stationen zu erwarten. Durch die Weiterentwicklung der GNSS-Technologie und die Nutzung neuer Sensoren und Messverfahren hat das Stationsnetz zukünftig das Potential, neue Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen.

1. Laufendhaltung der Hardware und Software der GREF Stationen

Die an den GREF-Stationen verwendete Technik unterliegt einer hohen Innovationsrate. Die geodätische Infrastruktur sowie die nachgelagerte Rechen- und Kommunikations-Infrastruktur muss auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik gehalten werden. Mit nahezu jedem Start eines neuen Satelliten der Navigationssysteme GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou ist derzeit auch eine Weiterentwicklung und Erweiterung des Funktionsumfangs des Raumsegmentes verbunden. Die Empfangsstationen am Boden (und damit auch die GREF-Stationen) müssen dieser Entwicklung folgen und regelmäßig modernisiert werden. Dies betrifft in erster Linie die laufende Aktualisierung der GNSS-Empfänger und -Antennen auf den Stationen. Der Innovations- und Produktzyklus im Bereich der GNSS-Empfangstechnik beträgt ca. 2 bis 3 Jahre. Die Technik an den GREF-Stationen muss deshalb spätestens alle 5 bis 6 Jahre komplett ersetzt werden. Die Untersuchung des Einsatzes von GNSS-Softwareempfängern für den Referenzstationsbetrieb ist Teil dieser Entwicklung.



Abbildung 3-16: GREF-Station Rantum auf Sylt (in Betrieb seit 05/2014)

Bedingt durch den drastischen Anstieg meist lokaler Anwendungen von Funkübertragungen (WLAN, Bluetooth, NFC etc.), nimmt das HF-Grundrauschen besonders in Ballungsgebieten stark zu. Dies führt beim Empfang der GNSS-Signale zu einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und bedingt eine schlechtere Genauigkeit der Messergebnisse. Besonders für Referenzstationsempfänger müssen die Auswirkungen des höheren HF-Grundrauschens unbedingt minimiert werden. Dazu sollten in Zukunft entsprechende selektiv arbeitende Empfänger mit programmierbaren hoch- und langzeitstabilen digitalen Filtern und dynamisch regelbaren Verstärkern, welche auch die entsprechenden Spektren und Störungen der zu empfangenden HF-Empfangsbänder selbst überwachen können, zum Einsatz gelangen. In einzelnen Fällen kann es dazu kommen, dass geeignete Ersatzstandorte für gestörte Referenzstationen eingerichtet werden müssen.

2. Optimierung der Rechen- und Kommunikationsinfrastruktur

Neben der GNSS-Empfangstechnik muss auch die Rechen- und Kommunikations-Infrastruktur den aktuellen Erfordernissen angepasst werden. Mit der zunehmenden Anzahl von Satelliten und Signalen steigen u.a. die Anforderungen an die verfügbare Bandbreite für die Datenfernübertragung. Die eingesetzte Hard- und Software zur Steuerung der Stationen, zur Datenspeicherung vor Ort sowie zur Datenfernübertragung muss den veränderten Sicherheitsanforderungen und den Prinzipien der Green IT genügen. Nur durch eine regelmäßige Aktualisierung der Software kann neuen Standards in der Datenübertragung, insbesondere im Bereich der Echtzeitpositionierung, Rechnung getragen und darauf aufbauende Dienste etabliert werden.

3. Optimierung von Ausfallsicherheit und Wartungsfreundlichkeit

Aus den genannten Gründen erfordert der Betrieb des Referenzstationsnetzes GREF daher neben den regulären Arbeiten zur Aufrechterhaltung des Stationsbetriebes, zur Wartung der Stationen sowie zu ihrer geodätischen Sicherung auch weiterhin regelmäßige Recherchen und Tests neuer Hard- und Softwarekomponenten. Nur so können Ausfallsicherheit und Wartungsfreundlichkeit auf dem erreichten Niveau gehalten oder sogar verbessert werden. Entsprechend den aktuellen Erfordernissen ist die zielgerichtete Erweiterung des Stationsnetzes durch neue Sensoren (z.B. Radarpegel, InSAR-Reflektoren) und durch neue Standorte für eine Erweiterung und Verbesserung der Positionierungsmöglichkeiten (z.B. im off-shore Bereich von Nord- und Ostsee) zu untersuchen.

Objective 9 Sicherstellung der Schwerereferenz für Deutschland

Das BKG definiert die Realisierung des nationalen Schwerestands, in den alle gravimetrischen Messungen in Deutschland über das Deutsche Schweregrundnetz eingebunden werden. Dazu betreibt es zwei verschiedene Messsysteme, die Absolutgravimeter und Supraleitgravimeter und unterhält Referenzstationen an den Standorten Bad Homburg und Wettzell. Weiterhin unterhält es das Deutsche Schweregrundnetz. Im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit leistet es Beiträge zu den gravimetrischen Arbeitsgruppen der internationalen Metrologie (CIPM) und der Internationalen Assoziation für Geodäsie:

- Mitgliedschaft in den internationalen Gremien der Metrologie als Vertreter der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) im „Consultative Committee for Mass and Related Quantities – Working Group on Gravimetry (CCM-WGG)“ beim BIPM
- Leitung der IAG-Arbeitsgruppe, JWG 2.2: „Absolute Gravimetry and Absolute Gravity Reference System“

1. Fortführung der Beteiligung am internationalen Schwerereferenzsystem

Durch den Einsatz von Absolutgravimetern und durch die Einbindung der vom BKG betriebenen gravimetrischen Referenzstationen ist das BKG ein integraler Bestandteil des internationalen Schwerereferenzsystems. Eine Verknüpfung mit den Messinstrumenten anderer Institutionen auf nationaler, europäischer und globaler Ebene findet durch die Teilnahme an den internationalen Vergleichen der Absolutgravimeter einerseits sowie durch das Angebot regelmäßiger Vergleiche auf den Referenzstationen des BKG zu regionalen Vergleichen andererseits statt.

Zur Überwachung des Schwerestands und zur Aufzeichnung von Schwerevariationen beispielsweise als Folge von Massentransporten im System Erde trägt das BKG durch seine Beteiligung am globalen Netz der Supraleitenden Gravimeter im „Global Geodynamics Project (GGP)“ bei. Diese Aufgabe befindet sich derzeit in der Umwandlung zum Permanenten Dienst der IAG.

2. Realisierung einer gravimetrischen Referenzstation am Geodätischen Observatorium Wettzell

Eine Realisierung der Referenzstation am Standort eines geodätischen Observatoriums ermöglicht die Kombination mit anderen geodätischen und geophysikalischen Zeitreihen und Interpretation der so gewonnenen Daten. Hier sind sowohl die zeitlichen Variationen, die aus Schwerefeldmodellen abgeleitet werden, als auch die Beobachtungen mit VLBI, Laser, GNSS und hydrologische Variationen zu nennen.

3. Beobachtung der Entwicklung neuartiger Technologien und Messprinzipien

Der Einsatz neuer physikalischer Messverfahren, wie Quantengravimetrie mit sogenannten Atominterferometern für die Bestimmung der Schwerebeschleunigung, und die geplante Nutzung hochgenauer optischer Uhren für die direkte Bestimmung des Schwerepotentials bilden zukünftige Herausforderungen in der Gravimetrie. Die beim BKG betriebenen Vergleichs- und Referenzstationen bilden hierbei eine wichtige Basis zur Ve-



Abbildung 3-17: Vergleich der Absolutgravimeter des Instituts für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover und des BKG im Gravimeterhaus am Geodätischen Observatorium Wettzell

rifikation und zur Verknüpfung alter und neuer Messtechnologien und liefern einen wichtigen Beitrag zur Realisierung und Kontinuität des globalen Schwerereferenzsystems.

Mit Atominterferometer, Quanteninterferometer oder auch Materiewelleninterferometer werden neue physikalische Prinzipien für Schweremessungen entwickelt. Interferometrie mit diesen Teilchen wird allgemein als „Quanteninterferometrie“ bezeichnet. Wählt man Materiewellen von Atomen, dann bezeichnet man die Interferometrie als „Atominterferometrie“. Ein frei fallendes Atom lässt sich physikalisch auch als Materiewelle auffassen. Spaltet man eine solche Welle mit geeigneten Strahlteilern kohärent auf und rekombiniert die beiden „Wellenzüge“ anschließend, so tritt analog zum Lichtwelleninterferometer Interferenz auf. Während in der Optik zur Aufspaltung und Rekombination halbdurchlässige Spiegel dienen, kommen in der Atominterferometrie z. B. Laserpulse zum Einsatz. Atominterferometer basieren auf Materiewellen ultrakalter Atome. Gegenüber Elektronen oder Neutronen, besteht der Vorteil der Atome darin, dass durch „laser cooling“ um mehrere Größenordnungen längere Messzeiten möglich sind und sich Strahlteiler und Spiegel des Interferometers aus optischen Pulsen präzise berechnen lassen, was eine gute Kontrollierbarkeit und Kontrolle erlaubt.

Das BKG wird verfolgen, inwiefern die technologischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Atominterferometrie für die Erfüllung der eigenen Aufgabenstellungen verwendbar werden und dazu die Kontakte zu den einschlägigen Institutionen aufrechterhalten und vertiefen. Das BKG stellt seine gravimetrischen Stationen für Vergleichsmessungen bereit und wird sich zu gegebener Zeit an adaptiven Entwicklungen beteiligen.

Objective 10 Datenhaltung und Bereitstellung der Mess- und Modellzeitserien

Der Wert von Daten kann nur in vollem Umfang ausgeschöpft werden, wenn eine Langzeitsicherung, schnelle und nutzerfreundliche Zugriffsmöglichkeiten, sowie eine adäquate Dokumentation einschließlich Metadaten gewährleistet sind.

Im wissenschaftlichen Kontext wird den Messdaten und der Produkterzeugung noch immer nicht die gleiche Bedeutung beigemessen wie wissenschaftlichen Publikationen in einschlägigen Fachzeitschriften. Dies liegt vor allem daran, dass sich der international angewandte Citation-Index zur Bewertung der wissenschaftlichen Arbeiten nur auf Fachpublikationen bezieht, nicht aber auf die Datensätze. In den meisten Fällen stellen jedoch Messdaten die unverzichtbare Grundlage der Publikationen dar. Hinsichtlich der operationellen Erzeugung von Produkten wird in der Regel eine Publikation in einschlägigen Fachzeitschriften abgelehnt. Doch gerade die zuverlässige Erzeugung hoch-genauer Produkte im Bereich des homogenen, konsistenten Raumbezugs stellt eine unabdingbare Grundlage für eine nachhaltige geodätische Infrastruktur dar, und damit auch die Grundlage für weitergehende Forschungsarbeiten.

1. Langzeitsicherung der Datenhaltung

Die FGS arbeitet seit Langem für eine nachhaltige Datenhaltung und -bereitstellung im Bereich der Geodäsie sowie für Daten angrenzender Disziplinen. Auch in Zukunft sollen die Datenbanken und Datenportale einschließlich ihrer zugrundeliegenden IT-Systeme auf dem neuesten Stand der Technik weiterentwickelt werden. Werkzeuge zur nutzerfreundlichen Abfrage, Extraktion und Visualisierung von Datensätzen sowie weitergehende Tools zur Datenanalyse (z.B. Zeitreihen-Analysen) sollen für die Datenbanken der FGS-Partner weiterentwickelt werden. Dazu zählen unter anderem:

Das IERS Daten- und Informationssystem, diverse Datenzentren für SLR-, VLBI- und GNSS-Daten, AGrav als internationale Datenbank für Absolutschweremessungen, und das Webportal für Altimetrie-Daten.

2. Ausarbeitung eines Konzeptes zur Nutzung von DOI für Messdaten und Produkte

Die FGS setzt sich zum Ziel, die Digital Object Identifier (DOI) auch für ihre Messdaten und operationellen Produkte Schritt-für-Schritt anwendbar zu machen. Die Umsetzung erfolgt in Zusammenarbeit mit dem GFZ Potsdam. Als Pilotprojekt dient die VLBI-Kombinationslösung, die als IVS-Beitrag zum ITRF2014 unter Beteiligung diverser FGS-Mitglieder erzeugt wurde. Basierend auf den Erfahrungen mit der VLBI-Kombinationslösung soll auch anderen Daten und Produkten der FGS eine DOI zugewiesen werden. Auch in der Vergangenheit wurden bereits einzelne Datenprodukte der FGS in das vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) und vom Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (Marum) getragene digitale Bibliothekssystem PANGAEA eingestellt und mit DOI-Nummern versehen. Dieses Portal soll auch künftig für die Publikation von Datenprodukten genutzt werden.

Anhang A Verantwortungsbereiche innerhalb der FGS

Nach der am 1. Juli 1983 geschlossenen Vereinbarung soll innerhalb der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie eine an den Möglichkeiten und Interessen der beteiligten Institutionen orientierte schwerpunktmäßige Zuordnung der Verantwortungsbereiche für die Durchführung der Forschungsvorhaben vorgesehen werden.

Die beteiligten Institutionen sind:

- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BGK),
- Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der Technischen Universität München (FESG),
- Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München (APG),
- Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM),
- Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn (IGG).

Abbildung A-1 gibt eine Übersicht über die beteiligten Institutionen und deren administrative Einbindungen. Tabelle A-1 fasst die Zuordnung der Verantwortungsbereiche der Vorhaben des formulierten Forschungsprogramms zusammen.

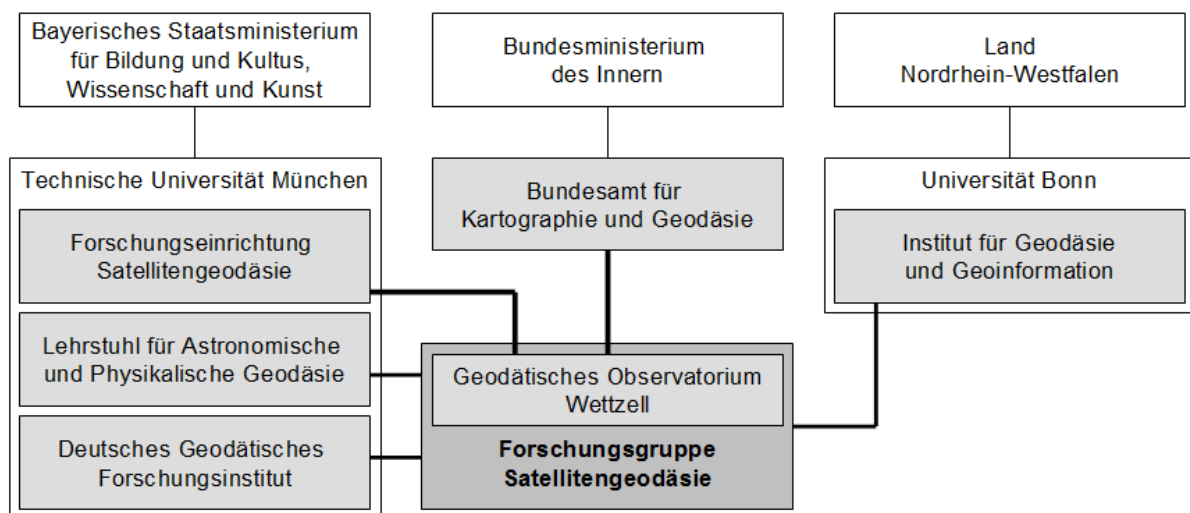


Abbildung A-1: Übersicht über die an der FGS beteiligten Institutionen und ihre administrative Einbindung

In Folge einer Strukturevaluierung der durch den Freistaat Bayern finanzierten nichtuniversitären Forschungseinrichtungen im Jahre 2012 wurde das DGFI zum 1. Januar 2015 in den Lehrstuhl für Geodätische Geodynamik (Prof. Seitz) der Ingenieur fakultät Bau, Geo, Umwelt (BGU) der Technischen Universität (TUM) integriert. Es trägt seither den Namen Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM). Das am 28. Oktober 2010 gegründete Centrum für Geodätische Erdsystemforschung (CGE) – bestehend aus dem dem IAPG, der FESG, dem DGFI sowie der Abteilung Erdmessung der KEG (Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften) wird in der Folge aufgelöst.

Seit dem 1. Januar 2015 entfallen Institute als Organisationsform in der Fakultät BGU der TUM. Rechtsnachfolger des Instituts für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG) ist der Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie (APG, Prof. Pail). Das Fachgebiet Satellit-

tengeodäsie (Prof. Hugentobler), welches ebenfalls Teil des IAPG war, wird im Forschungsprogramm nicht separat geführt, sondern wird der Einfachheit halber mit den Aufgabenbereichen der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) zusammengefasst.

Tabelle A-1: Zuordnung der Verantwortungsbereiche

Forschungsschwerpunkt	Im Verantwortungsbereich von				
Thematik	BKG	FESG	APG	DGFI	IGG
Geodätisches Observatorium	X	X			
Punktbestimmung	X	X		X	X
Erdrotation	X	X		X	X
Meeresoberfläche				X	
Gravitationsfeld	X		X	X	
Geophysikalische Fluide	X		X	X	
Kombination/Integration	X	X	X	X	X

Anhang B Instrumentelle Ausstattung der Observatorien der FGS**Wettzell**

Technik	Ausstattung
VLBI	20 m Radioteleskop (RTW) 13 m VGOS Radioteleskop (TTW-1) 13 m VGOS Radioteleskop (TTW-2)
SLR	Wettzell Laser Ranging System (WLRS) Satellite Observing System Wettzell (SOS-W)
GNSS	3 IGS-Stationen (WTZA, WTZR, WTZZ) 1 IGS/CONGO-Station (WTZS) 1 GREF Real-Time Station (WT21) 6 Footprint-Stationen (ARBR, ARNB, HOWA, KOEZ, MILT, PRAC)
Inertiale Erdrotations-messung	Großringlaser "G"
Zeit/Frequenz	3 Wasserstoffmaser (EFOS 18, EFOS 39, EFOS 60) 5 Cs-Atomuhren HP 5071 A 2 GPS-Zeitempfänger
Gravimetrie	Supraleitendes Gravimeter SG29 Supraleitendes Gravimeter SG30 Absolutgravimeter FG5 (kampagnenweise)
Seismologie	Dreikomponenten-Breitbandseismometer STS-2 Dreikomponenten-Seismometer Le-3D/20s
Neigungsmessung	Askania Bohrloch-Gezeitenpendel 5 Plattform-Tiltmeter Lippmann HRTM 2 Bohrloch-Tiltmeter AGI 722
Meteorologie	2 Wetterstationen (p, T, F, Wr, Wg, Nd) 2 Präzisionsbarometer an den SGs 4 Barometer an den Footprint-Stationen 1 Wasserdampfradiometer
Hydrologie	5 Messfelder für Bodenfeuchte und -temperatur mit insgesamt 168 TDR-Sonden, 30 Tensiometern und 19 Bodentemperatursensoren 2 Niederschlagssensoren 9 Grundwasser-Messtellen 1 Abflusswehr 1 Lysimeter-Messsystem (Gewicht, Saugspannung, Sickerwasser, Global- und Nettostrahlung, Windgeschwindigkeit) 1 Schneehöhen- und -massensensor
SAR	2 SAR Cornerreflektoren
Lokale Vermessung	terrestrisches Vermessungsnetz bestehend aus 28 Messpfeilern und 20 Bodenpunkten

TIGO

Technik	Ausstattung
VLBI	6 m Radioteleskop
SLR	TIGO Laser Ranging System (TLRS)
GNSS	1 IGS-Station (CONZ) 1 CONGO-Station (CONX) 1 lokale Station (CONT)
Zeit/Frequenz	2 Wasserstoffmaser (EFOS 20, EFOS 24) 2 Cs-Atomuhren HP 5071 A 2 GPS-Zeitempfänger
Gravimetrie	Supraleitendes Gravimeter SG38 Absolutgravimeter FG5 #227
Seismologie	Dreikomponenten-Breitbandseismometer Guralp
Meteorologie	1 Wetterstation (p, T, F, Wr, Wg, Nd) 1 Präzisionsbarometer am SG
Hydrologie	2 Messfelder für Bodenfeuchte mit insgesamt 40 TDR-Sonden und 6 Tensiometern 1 Klimastation (T, F, Wr, Wg, Strahlung) 4 Niederschlagssensoren 1 Grundwasser-Messtelle 2 Bachpegel zur Abflussmessung
Lokale Vermessung	terrestrisches Vermessungsnetz bestehend aus 4 Messpfeilern und 9 Bodenpunkten

GARS O'Higgins

VLBI	9 m Radioteleskop
GNSS	2 IGS-Stationen (OHI2, OHI3)
Zeit/Frequenz	1 Wasserstoffmaser (EFOS 50) 1 Cs-Atomuhr HP 5071 A
Gravimetrie	Absolutgravimeter FG5 (kampagnenweise)
Meteorologie	1 Wetterstation (p, T, F, Wr, Wg)
Pegelmessung	1 Unterwasser-Drucksonde 1 Radarpegel mit GNSS-Antenne
SAR	2 SAR Cornerreflektoren
Lokale Vermessung	terrestrisches Vermessungsnetz bestehend aus 6 Messpfeilern und 1 Bodenpunkt

Anhang C Haushaltmäßige Absicherung des Programms

Die an der FGS beteiligten Institutionen bemühen sich im Sinne der geschlossenen Vereinbarung, die zur Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsvorhaben erforderliche Arbeitskapazität (Personal und Sachausstattung) sowie die erforderlichen Haushaltsmittel bereitzustellen. Dies gilt insbesondere auch hinsichtlich der Beteiligung an den Kosten des Betriebs und der Entwicklung des Geodätischen Observatoriums Wettzell, der Übergangsphase des Argentinian-German Geodetic Observatory in La Plata, Argentinien, und der Beobachtungsstation in O'Higgins, Antarktis.

Art und Umfang der Beteiligung richtet sich einerseits nach der Zuordnung der Verantwortungsbereiche für die Durchführung der Forschungsvorhaben, andererseits nach den haushaltmäßigen Möglichkeiten der Beteiligten. Das BKG trägt dabei mit dem Ausbau und Betrieb des Geodätischen Observatoriums Wettzell eine Grundlast, die eine entscheidende Voraussetzung für die Lösung der Aufgaben der FGS ist. Darüber hinaus leistet das BKG signifikante Beiträge zu Entwicklungsarbeiten, die Anlage und Laufendhaltung der europäischen Bezugssysteme in Lage, Höhe und Schwere für die Referenzierung von Geoinformationssystemen sichert. Das DGFI hat vor allem verantwortliche Aufgaben für das Internationale Terrestrische Referenzsystem übernommen. Die FESG stellt notwendiges Personal für wissenschaftliche Entwicklungsarbeiten und den Betrieb des Radioteleskops Wettzell und für den Ringlaser zur Verfügung. Das IGG sichert die Korrelation der VLBI-Beobachtungen. In gleicher Weise tragen alle FGS Partner Auswertekapazitäten zu den Vorhaben der FGS bei und beteiligen sich an den internationalen Diensten, wie in Anhang D dargestellt. Die gegenwärtig von den Beteiligten aus der Grundausrüstung bestrittenen Aufgaben sind in der folgenden Tabelle C-1 zusammengestellt.

Tabelle C-1 Beiträge der FGS Partner aus der Grundausrüstung

BKG	Betrieb des Geodätischen Observatoriums Wettzell
	Betrieb des Transportablen Integrierten Observatoriums in Concepción
	Betrieb der GARS, O'Higgins
	Betrieb von GNSS-Stationen für IGS
	IVS-Datenzentrum (VLBI)
	IVS-Analysezentrum (VLBI)
	IVS-Kombinationszentrum (VLBI)
	ILRS-Analysezentrum (SLR)
	IGS Regionales Datenzentrum
	GNSS NTRIP Echtzeitdatenzentrum
	Beteiligung am CODE Rechenzentrum des IGS
	GREF Operations-, Daten- und Analysezentrum
	Vorsitz des GGOS Coordinating Boards
	IERS Zentralbüro
	GGOS Portal
	Earth Rotation Information System (ERIS)
	Beteiligung am International Gravity Field Service (IGFS)
DGFI	Generalsekretariat der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG)
	Sekretariat der IAU Commission A2 „Rotation of the Earth“
	Betrieb von GPS-Stationen für IGS und SIRGAS
	ITRS Kombinationszentrum
	IGS Regionales Assoziiertes Analysezentrum für SIRGAS (GPS)
	IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Project (TIGA) Analysezentrum
	ILRS-Datenzentrum, EUROLAS Datenzentrum (SLR)

Fortsetzung Tabelle C-1

DGFI	ILRS-Analysezentrum (SLR)
	ILRS-Operationszentrum (SLR)
	IVS-Analysezentrum (VLBI)
	ELT Datenzentrum
	Beteiligung am IVS-Kombinationszentrum (VLBI)
	Aufbau des Internationalen Altimeter Service (IAS)
	Leitung des GGOS Bureau of Products and Standards
	Leitung der IGS Antennen Working Group
	Präsidenschaft der Geodäsie Division der „European Geosciences Union“ (EGU)
FESG	Beteiligung am Betrieb der Radioteleskope am Geodätischen Observatorium Wettzell
	Beteiligung an der Entwicklung des neuen Zeitverteilungssystems
	Beteiligung an der Automatisierung und Fernsteuerbarkeit der Instrumente
	Beteiligung an der Entwicklung des neuen SLR-Systems SOS-W
	Beteiligung an der Fortentwicklung des SLR-Systems WLRS
	Koordination und Datenanalyse von ELT
	Beteiligung am Betrieb des Ringlasers G
	Beteiligung am Aufbau eines Dreikomponenten-Ringlasers in Fürstenfeldbruck
	Beteiligung am Aufbau eines Dreikomponenten-Ringlasers im Gran Sasso
	Beteiligung an der Entwicklung grosser Ringlaser in Christchurch (NZ)
	Betrieb des Geosensors in Piñon Flat, Kalifornien
FSG	Beteiligung am CODE Rechenzentrum des IGS
	Beteiligung am GGOS Bureau for Standards and Products
	IGS MGEX Analysezentrum
	Vorsitz des IGS Governing Board (bis 2014)
APG	Arbeiten zur ESA Satellitenmission GOCE
	Sensoranalyse Satellitengravimetrie
	Hochauflösende Kombinierte Schwerefeldmodellierung
IGG	IVS-Korrelationszentrum (VLBI)
	IVS-Analysezentrum (VLBI)
	IVS-Operationszentrum (VLBI)
	Vorsitz des IVS Directing Board

Die Forschungsgruppe bemüht sich über Anträge bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), bei der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA), der DLR Raumfahrt-Agentur und weiteren Projektgebern um die Einwerbung von Drittmitteln für Einzelprojekte und Verbundvorhaben im Rahmen des Forschungsprogramms.

Die Tabellen C-2 und C-3 geben eine detaillierte Zusammenstellung der laufenden und beantragten sowie der in den Jahren 2011 bis 2015 abgeschlossenen Drittmittelprojekte, die die Ziele des Forschungs- und Entwicklungsprogramms der FGS berühren.

Tabelle C-2 Liste der laufenden, bewilligten und beantragten Drittmittelprojekte

Antragsteller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
BKG	GMV	TGVF FOC	Time and Geodetic Validation Facility, Full Orbit Capability	laufend
DGFI	ESA	SWARM+ Innovations	Swarm Magnetic Gradients for Lithospheric Modelling	laufend
DGFI	ESA	4000113651	GOCE Plus – MassBalance	laufend
DGFI	ZGeoBW	M/AMGO/DA495	Einrichtung eines operationellen Dienstes zur Bereitstellung von Ionosphäreninformationen beim Weltraumlagezentrum der Luftwaffe (OPTIMAP)	laufend
DGFI	TUM	HWP Gender	Mass variations in continental surface waters	laufend
DGFI	TUM	HWP Gender	Signals of weather extremes in soil moisture and continental water storage from multi-sensor Earth observation and hydrological modeling	laufend
DGFI	DFG	BO 4120/2-1	Konsistente Schätzung von ultra-hochauflösenden Erdoberflächenschweredaten (UHRGravDat)	laufend
DGFI	DFG	SE 1916/4-1	Assessing the spatiotemporal dynamics of water volumes in large wetlands and lakes by combining remote sensing with macro-scale hydrological modelling (WLDYN)	laufend
DGFI	DFG	SE 1916/5-1	Direct geocentric realisation of the American reference frame by combination of geodetic observation techniques (DIGERATI)	laufend
DGFI	DFG	BO 1228/13-1 DE 2174/3-1	Variations in Ocean currents, sea ice concentration and sea surface temperature along the North-East coast of Greenland (NEG-Ocean)	laufend
DGFI	DLR	50 LZ 1403	Entwicklung eines neuartigen adaptiven Modells zur Darstellung von globalen Ionosphäreninformationen aus der Kombination geodätischer Raumverfahren (ADAPIO)	laufend
DGFI APG	TUM	IGSSE 6.01	Signals of Climate Variability in Continental Hydrology from Multi-Sensor Space and In-situ Observations and Hydrological Modeling (CLIVAR-Hydro)	laufend
DGFI APG	TUM	IGSSE Water 07	Monitoring and Prediction of Regional Water Availability for Agricultural Production under the Influence of Climate Anomalies and Weather Extremes (REWAP)	laufend
FESG	DLR/BMWi	50NA1301	Einsatz optischer Uhren in der Satellitennavigation (OCTAGON2)	laufend
FESG	DFG	SCHR 645/6-1	Enhanced G: Precision Ring Laser Earth Rotation Sensing for Space Geodesy at the Quantum Limit	laufend
FESG BKG	ESA	RFQ/3-14099/14/D/SR	Accurate Orbit Determination of Space Debris with Laser Tracking/Tasking	laufend
FESG	DLR/BMWi		Galileo Optical Intersatellite Links GOISL	beantragt

Fortsetzung Tabelle C-2

FESG	DLR/BMWi		Absolute Distance Accurately Measured and External Vehicle Adjustment (ADAM&EVA)	beantragt
FESG	DAAD	Leonhard Euler Stipendium 2014/15	Mit ETU St. Petersburg, Alexander Ku-kaev, "Bestimmung dynamischer Deformationen eines 20m Radioteleskops mit Hilfe von faseroptischen Kreisel"n	laufend
FSG	DFG	HU 1558/7-1	DORIS solutions improvement and combinations with other techniques of space geodesy	laufend
FSG	ESA	AO/1-7322/12/I-NB	GMES Sentinel Precise Orbit Determination Service	laufend
FSG	ESA	AO/1-7686/13/NL/MM EGEF ID 68	Galileo Second Generation Orbit Determination and Time Synchronization G2GODTS	laufend
APG	ESA	GOCE-HPF	GOCE High Level Processing Facility: Management & coordination; non-tidal time variable gravity field; SST data analysis for gravity field recovery; orbit & gravity field validation	laufend
APG	ESA	GOCE-PDS	GOCE-Payload Data System	laufend
APG	ESA	NGGM Constellation	Assessment of satellite constellations for monitoring the variations in Earth's gravity field	laufend
APG	ESA	GOCE Data AO	Combination of GOCE Data with complementary Gravity Field Information (GOCO)	laufend
APG	Munich Aerospace	Geodetic SAR	Hochauflösende geodätische Erdbeobachtung	laufend
APG	ESA	REGINA	Regional glacial isostatic adjustment and CryoSat elevation rate corrections in Antarctica	laufend
APG	ESA	STSE Mass Balance	Antarctic Peninsula Mass Balance (APMB) project	laufend
APG	DFG	SAMPLE	Separierung von aktuellen Gravitations-signalen im Südatlantik	laufend
APG	DFG	ICE-SHEET-GEO	Variations of Ice Sheet Geometry, Ice Flow and Mass Distribution in NE Greenland	laufend
APG	DFG	GETRIS	Zweiwege-Satellitenverfolgung als Basis für Schwerefeldmissions-Szenarien	laufend
APG	DLR	SWARM-Cal-Val	SWARM - Validierung von geodätischen Datenprodukten	laufend
APG	DLR	GeodeticSAR	Dokumentation von Verfahren zur Korrektur der Erd-Tiden und des Atmosphäreninflusses beim geodätischen SAR	laufend
IGG	DFG	NO318/10-1	Turbulenzuntersuchungen mittels lokalem VLBI-Interferometer und kleinräumigen GNSS-Beobachtungen zur verbesserten Modellierung atmosphärischer Refraktionsvariationen	laufend
IGG	EU	EMRP Research Grant SIB60-REG3	The interaction of GNSS antennas with near-field and surrounding as contributions to the GNSS uncertainty model	laufend

Fortsetzung Tabelle C-2

Verbundprojekte				
BKG	DFG	Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse" FOR 584	Earth Rotation Information System: Development of a virtual Earth rotation system for geodetic and geoscience applications (ERIS)	beendet
BKG FESG			Modelling of episodic-transient signals in measurements of large ring lasers	beendet
DGFI FESG			Integration of Earth rotation, gravity field and geometry using space geodetic observations ("Rotation, gravity and geometry")	laufend
BKG DGFI IAPG			Combined analysis and validation of Earth rotation models and observations	beendet
FESG			Lunar Laser Ranging: Consistent mod- elling for geodetic and scientific applica- tions	beendet
IGG			Investigation of sub-daily and episodic variations of Earth rotation	beendet
APG	DFG	SPP 1788 Dynamic Earth	Interactions of Low-orbiting Satellites with the Surrounding Ionosphere and Thermosphere (INSIGHT)	geneh- migt
BKG DGFI	DFG	DFG Forscher- gruppe "Space- Time Reference Systems for Moni- toring Global Change and for Precise Navigation in Space" FOR 1503-2	Konsistente zälestische und terrestri- sche Referenzrahmen durch verbesserte Modellierung und Kombination (PN5-I)	laufend
BKG DGFI			Konsistente zälestische und terrestri- sche Referenzrahmen durch verbesserte Modellierung und Kombination (PN5-II)	geneh- migt
FESG			Ko-Lokation der geodätischen Welt- raumverfahren auf der Erde und im Weltraum (PN7-I)	laufend
FESG			Ko-Lokation der geodätischen Welt- raumverfahren auf der Erde und im Weltraum (PN7-II)	laufend
FSG DGFI			Konsistente dynamische Referenz- rahmen und terrestrische Datums- parameter (PN6-I)	laufend
FSG DGFI			Konsistente dynamische Referenz- rahmen und terrestrische Datums- parameter (PN6-II)	laufend
IGG		FOR 1503	Internationaler himmelfester Referenz- rahmen (ICRF-3)(PN2-I)	laufend
IGG			Zentralprojekt: Raum-zeitliche Refe- renzsysteme für den Nachweis des globalen Wandels und für präzise Navi- gation im Weltraum	laufend

Tabelle C-3 Liste der im Zeitraum 2011-2015 abgeschlossenen Drittmittelprojekte

Antrag- steller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
BKG	Thales Ale- nia Space	TGVF IOV	Time and Geodetic Validation Facility, In Orbit Validation	beendet
DGFI	ESA	GOCE-HPF	GOCE scientific pre-processing and external calibration	beendet
DGFI	ESA	4000102846	Heterogeneous gravity data combina- tion for Earth interior and geophysical exploration research	beendet
DGFI	ESA	4000102845	GOCE Plus – Time Variations	beendet
DGFI	ZGeoBW	M/UR1D/8A229/ 8A576	Softwareanwendung für die Erzeugung hochgenauer regionaler Geoidmodelle als Höhenbezugsfläche für Einsatzge- biete (RegGrav-I)	beendet
DGFI	ZGeoBW	M/U2CD/CA030/BA 444	Erweiterung einer Software-Anwendung um die Prozessierung von GOCE-Daten zur Erzeugung hochgenauer Geoidmo- delle als Höhenbezugsfläche in Einsatz- gebieten (RegGrav-II)	beendet
DGFI	TUM	HWP Gender	Investigation of data compression by a multi-scale representation of a regional ionosphere signal	beendet
DGFI	Prof. Ruder, Tübingen		Animation Meeresspiegel	beendet
DGFI	AvH	AGGA	Aeronomy and Geodesy in collaboration between Germany and Argentina	beendet
DGFI	Erasmus Mundis	Arcoiris	Crustal deformation model in response to regional geophysical fluid variations determined by GRACE	beendet
DGFI FGS	DFG	SCHM 2433/2-1 HU 1558/3-1	Multi-Skalen-Ionosphärenmodell aus der Kombination moderner Satelliten- verfahren ("MuSIK")	beendet
FESG	DLR/BMWi	50NA0904	Einsatz optischer Uhren in der Satelli- tennavigation (OCTAGON)	beendet
FESG	DFG	SCHR 645/3-1 SCHR 645/3-2	Earthquake induced rotational ground motion	beendet
FESG	EU/FP7	NEXPreS 261525 FP7- INFRASTRUC- TURES-2010-2	Novel EXplorations Pushing Robust e-VLBI Services	beendet
FESG	ESA	AO/1- 6311/2010/F/WE	Geodesy and Time Reference in Space GETRIS	beendet
FESG	VERTEX Antennen- technik		Prototyp for Orbit Prediction Mode	beendet
FESG	DAAD	Leonhard Euler Stipendium 2010/11	Mit ETU St. Petersburg, Ilya Surov, "Evaluation von Anwendungsmöglich- keiten von faseroptischen Kreiseln in der Seismologie"	beendet
FESG	DAAD	Leonhard Euler Stipendium 2011/12	Mit ETU St. Petersburg, Olga Popova, "Anwendung faseroptischer Kreisel zur Korrektur seismischer Messungen bei starken seismischen Ereignissen"	beendet

Fortsetzung Tabelle C-3

FESG	DAAD	Leonhard Euler Stipendium 2012/13	Mit ETU St. Petersburg, Artem Makarov, "Einsatz hochpräziser Winkelmesssysteme zur Kalibrierung optischer Rotationsensoren"	beendet
FESG	DAAD	Leonhard Euler Stipendium 2013/14	Mit ETU St. Petersburg, Andrey Dzyuba, "Untersuchung von Konzepten zur Konstruktion von mittels faseroptischen Kreisel stabilisierten Plattformen"	beendet
FSG	DFG	HU 1558/1-1	Geodätische und geodynamische Nutzung reprozeessierter GPS-, GLONASS und SLR-Daten	beendet
FSG	DFG	HU 1558/4-1	LEO orbit modeling improvement and application for GNSS and DORIS LEO satellites	beendet
FSG	ESA	AO/1-6231/09/D/SR	Satellite and Station Clock Modelling for GNSS	beendet
APG	ESA	NGGM	Next Generation Gravity Field Mission	beendet
APG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	IMPALA: Verbesserte Modellierung der Akzelerometer und alt. Level 1 Prozessierung	beendet
APG	DLR	GOCE Projektbüro	GOCE Projektbüro	beendet
APG	TUM	IGSSE Mass Transport	Mass Transport from Constellation Flights (SWARM)	beendet
IGG	DFG	NO318/5-1	Verbesserte Bestimmung der Erdrotation durch Nutzung des Wettzell Twin-Radioteleskops mit optimierten Beobachtungsplänen	beendet
Verbundprojekte				
BKG	DFG	SPP 1257 Massentransporte und Massenverteilung im System Erde	Temporal And Spatial Multiscale Assessment of mass transport by combination of Gravity Observations from GRACE and terrestrial stations (TASMAGOG)	beendet
DGFI			Dynamical and residual ocean tide analysis for improved GRACE de-aliasing (DAROTA)	beendet
DGFI APG			Sea surface topography and mass transports of the Antarctic Circumpolar Current (GEOTOP 2)	beendet
DGFI APG			Konsistente Schätzung von Massenvariationen in kontinentalen Wasserspeichern durch kombinierte Inversion eines globalen hydrologischen Modells mit zeitvariablen Schwerefeldbeobachtungen (CEMIG)	beendet
DGFI			Combined ocean tide analysis by GRACE and altimetry data (COTAGA)	beendet
APG			Improved de-aliasing for gravity field modelling with GRACE (IDEAL-GRACE 2), Improved Modelling of non-tidal Mass Variations for optimized Gravity Field Analysis (IMPLY)	beendet

Fortsetzung Tabelle C-3

APG			Integrated Modelling of Satellite and Airborne Gravity data of Active plate margins (IMOSAGA)	beendet
BKG DGFI APG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	REAL-GOCE: Realdatenanalyse GOCE	beendet

Anhang D Beteiligung der FGS an den internationalen Diensten

Die folgende Tabelle dokumentiert die Beteiligung der FGS an den wissenschaftlichen Organisationen und Diensten der IAG sowie der IAU und in der EGU.

Funktion / Verantwortlichkeit	FGS Institution				
	APG	BKG	DGFI	FESG	IGG
Internationale Assoziation der Geodäsie (IAG)					
IAG Büro			Chair		
Vertretung im Executive Committee					
SC 1.3 Regional Reference Frames					
SC 1.4 Interaction of Celestial and Terrestrial Reference Frames					
SC 2.3 Dedicated Satellite Gravity Missions	Chair				
SC 2.5 Satellite Altimetry					
JSG 0.5 Multi-sensor Combination for the Separation of Integral Geodetic Signals			Chair		
JWG 1.1 Tie Vectors and Local Ties					
JWG 1.2 Modelling Environmental Loading Effects for Reference Frame Realizations					
JWG on Understanding the Relationship of Terrestrial Reference Frames for GIA and Sea-level Studies					
JWG 1.4 Strategies for Epoch Reference Frames			Chair		
JWG 2.1 Techniques and Metrology in Absolute Gravimetry					
JWG 2.2 Absolute Gravimetry and Absolute GRS		Chair			
JWG 2.3 Assessment GOCE Geopot. Models					
SG 4.3.1 Ionosphere Modelling and Analysis			Chair		
JWG 0.1.1 Vertical Datum Standardization			Chair		
ICCT JSG 0.1 Application of Time Series Analysis in Geodesy					
ICCT JSG 0.3 Methodologies in Regional Gravity Field Modelling			Chair		
ICCT JSG 0.5 Multi-sensor Combination for the Separation of Integral Geodetic Signals			Chair		
ICCT JSG 0.6 Application of Current GRACE Solution Strategies to Next Generation of Inter-satellite Range Observations					

	APG	BKG	DGFI	FESG	IGG
Globales Geodätisches Beobachtungssystem (GGOS)					
Vorsitz (2011-2015)		Chair			
Vertretung im Executive Committee					
Vertretung im Coordinating Board					
Vertretung im Consortium					
GGOS Portal		Chair			
Bureau of Products and Standards			Chair		
WG Satellite Missions	Chair				
WG Data & Information System		Chair			
WG ITRS Standards					
WG Performance Simulations & Architectural Trade-Offs (PLATO)		Chair			
GGOS Theme 1 Unified Height System		Chair			
International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)					
Zentralbüro und Datenbank		Chair			
Vertretung im Directing Board					
ITRS Combination Centre			Chair		
WG Combination at the Observation Level					
WG Site Survey and Co-locations					
WG SINEX Format		Chair			
WG Site Coordinate Time Series Format					
International Gravity Field Service (IGFS)					
Vertretung im Advisory Board					
International Gravity Bureau					
WG Absolute Gravimetry					
Global Geodynamics Project					
International GNSS Service (IGS)					
Vorsitz (2011-2014)				Chair	
Vertretung im Governing Board					
Beobachtungsstationen					
CODE Analysezentrum					
Regionales Datenzentrum Europa u. SIRGAS					
Regionales Analysezentrum (EUREF u. SIRGAS)					
Tide Gauge Benchmark (TIGA) Analysezentrum					
IGS Multi-GNSS Experiment					
IGS Realtime Service Kombinationszentrum					
IGS Realtime Service Analysezentrum					

	APG	BKG	DGFI	FESG	IGG
Data Center Working Group					
Real Time Working Group					
RINEX Working Group					
Ionosphere Working Group					
Antenna Working Group			Chair		
Tide Gauge Working Group					
Space Vehicle Orbit Dynamics Working Group					
International Laser Ranging Service (ILRS)					
Vertretung im Governing Board					
Analysezentrum					
Datenzentrum / Operationszentrum					
Beobachtungsstationen					
Networks and Engineering Working Group					
Data Formats and Procedures Working Group			Chair		
Analysis Working Group					
Missions Working Group					
Transponder Working Group					
International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)					
Vorsitz					Chair
Vertretung im Directing Board					
Analysezentrum					
Kombinationszentrum					
Datenzentrum					
Korrelationszentrum					
Operationszentrum					
Beobachtungsstationen					
International Altimetry Service (IAS)					
Vorsitz beim Aufbau			Chair		
International Astronomical Union (IAU)					
Commission A1 Astrometry					
Commission A2 Rotation of the Earth			Secret.		
Division A WG Third Realization of the ICRF					
JWG IAU/IAAG Theory of Earth Rotation, Sub-WG 2 Polar Motion and UT1					
European Geosciences Union (EGU)					
Division on Geodesy: President, Vice-President			Presid.		

Anhang E Zitierte Literatur

- Drewes, H. (2007): Science rationale of the Global Geodetic Observing System (GGOS). Springer, IAG Symposia, Vol. 130, 703-710.
- GGOS (2012): Global Geodetic Observing System (GGOS): Site Requirements for GGOS Core Sites (Revision 1a), 18. Juli 2012, 17 Seiten. WWW (26.02.2015): http://cddis.gsfc.nasa.gov/docs/2011/GGOS_SiteReqDoc.pdf
- Hurst, R. B., N. Rabeendran, K. U. Schreiber, and J.-P. R. Wells, Correction of backscatter-induced systematic errors in ring laser gyroscopes, Appl. Opt, vol. 53, no. 31, pp. 7610–7618, 2014.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Plag, H.-P., M. Pearlman (Eds.) (2009): Global Geodetic Observing System – Meeting the requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Springer.
- Petit, G., B. Luzum (eds.).(2010) IERS Conventions 2010, IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, ISBN 3-89888-989-6
- Rummel, R., H. Drewes, H., W. Bosch, H. Hornik (2000): Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS). IAG Symposia, Vol. 120, Springer, ISBN (Print) 3-540-67079-3, ISSN 0939-9585.
- Schneider, M. (Ed.) (1990): Satellitengeodäsie – Ergebnisse aus dem gleichnamigen Sonderforschungsbereich der Technischen Universität München. Deutsche Forschungsgemeinschaft, VCH Verlagsgesell

Anhang F Verwendete Abkürzungen

ACES	Atomic Clock Ensemble in Space
AG	Absolutgravimeter
AGGO	Argentinian-German Geodetic Observatory
APG	Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU München
AWI	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
BGU	Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der TU München
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main
BMARS	Multivariate Adaptive Regression B-Spline
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMI	Bundesministerium des Innern
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BPS	GGOS Bureau for Products and Standards
CCD	Charge Coupled Device
CCM-WGG	Consultative Committee for Mass and Related Quantities - Working Group on Gravimetry
CGE	Centrum für Geodätische Erdsystemforschung
CHAMP	Challenging Mini Satellite Payload
CIPM	Comité International des Poids et Mesures
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
COSMIC	Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate
COSMO	Consortium for Small-Scale Modelling
CRF	Celestial Reference Frame
CVS	Concurrent Versions System
CW	Continuous Wave
DAHITI	Database for Hydrological Time Series of Inland Water
DBBC	Digital Baseband Converter
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFN	Deutsches Forschungsnetz
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der TU München
DGK	Deutsche Geodätische Kommission
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DIS	Data Information System
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOI	Digital Object Identifier
DORIS	Détermination d'orbite et radiopositionnement intégrés par satellite
DOT	Dynamische Ozeantopographie
DWD	Deutscher Wetterdienst
EDC	European Data Center des ILRS
EGU	European Geosciences Union
ELT	European Laser Time Transfer
EOP	Erdorientierungsparameter
EOT	Empirical Ocean Tide Model
ERF	Epoch Reference Frame
ERIS	Earth Rotation Information System
ERP	Erdrotationsparameter
ERC	European Research Council
ESA	European Space Agency
EUREF	Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe

EVN	European VLBI Network
FESG	Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, TU München
FGS	Forschungsgruppe Satellitengeodäsie
FSG	Fachgebiet Satellitengeodäsie, TU München
GAIN	Gravimetric Atom Interferometer
GARS	German Antarctic Receiving System
GCOS	Global Climate Observing System
GEO	Intergovernmental Group on Earth Observation
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems
GFZ	GeoForschungsZentrum, Potsdam
GGIM	Global Geospatial Information Management
GGOS	Global Geodetic Observing System
GGP	Global Geodynamics Project der IAG
GGRF	Global Geodetic Reference Frame
GIA	Global Istostatic Adjustment
GINGER	Gyroscope in General Relativity
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema, russisches Navigationssystem
GMES	Global Monitoring of Environment and Security
GNSS	Global Navigation Satellite System
GO	Geodätisches Observatorium
GOCE	Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer
GOCO	Gravity Observation Combination
GOOS	Global Ocean Observing System
GOW	Geodätisches Observatorium Wettzell
GPS	Global Positioning System (amerikanisches Navigationssystem)
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRASP	Geodetic Reference Antenna in Space
GREF	German Reference Frame
GRDC	Gobal Runoff Data Center
HEO	High Earth Orbiter
HPF	High-level Processing Facility
IAG	Internationale Assoziation für Geodäsie
IAPG	Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München
IAS	International Altimetry Service
IAU	Internationale Astronomische Union
ICON	COsahedral Nonhydrostatic
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IDS	International DORIS Service
IERS	International Earth rotation and Reference Systems Service
IfAG	Institut für Angewandte Geodäsie, heute BKG
IfE	Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover
IGETS	International Gravity and Earth Tides Service
IGFS	Ingernational Gravity Field Service
IGG	Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn
IGSSE	TUM Graduate School of Science and Engineering
IGS	International GNSS Service
ILRS	International Laser Ranging Service
INFN	Instituto Nazionale di Fisica Nucleare
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar

INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
ISS	International Space Station
IT	Information Technology
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
KEG	Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
LARGE	LAser Ranging to GNSS s/c Experiment des ILRS
LEO	Low Earth Orbiter
LIDAR	Light Detection and Ranging
LLR	Lunar Laser Ranging
LMU	Ludwig-Maximilian-Universität München
LRO	Lunar Reconnaissance Orbiter
MARUM	Zentrum für Marine Umweltwissenschaften
MGEX	Multi-GNSS Experiment des IGS
MSD	Multi-Skalendarstellung
NASA	National Air and Space Agency, USA
NEXPRoS	Novel EXplorations Pushing Robust e-VLBI Services
NPL	National Physical Laboratory, Teddington
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OCTAGON	Optical Clock Technologies and their Applications for Globally Optimized Navigation
PC	Personal Computer
PLATO	Performance Simulations and Architectural Trade-Offs, GGOS Arbeitsgruppe
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Pulse Per Second
PRN	Pseudo Random Noise
PSI	Persistent Scatterer Interferometry
PSInSAR	Persistent Scatterer Interferometric SAR
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QOM	Quantum Optics and Metrology, Humboldt Universität Berlin
QZSS	Quasi Zenith Satellite System, Japan
RAID	Redundant Array of Independent Disks
RFI	Radio Frequency Interference
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
ROMY	Rotation Motion in Seismology
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTW	Radioteleskop Wettzell
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Länder
SAR	Synthetic Aperture Radar
SFB	DFG Sonderforschungsbereich
SG	Supraleitendes Gravimeter
SINEX	Software Independent Exchange Format
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
SLR	Satellite Laser Ranging
SOS-W	Satellite Observing System Wettzell
SSH	Secure Shell
SWOT	Surface Water Ocean Topography
SYRTE	Systèmes de Référence Temps-Espace
TAI	Temps Atomique International

TEC	Total Electron Content
TID	Traveling Ionospheric Disturbance
TIGA	Tide GAuge benchmark monitoring project
TIGO	Transportables Integriertes Geodätisches Observatorium
TRF	Terrestrial Reference Frame
TTW	Twin Telescope Wettzell
TUM	Technische Universität München
UN	United Nations
UN-GGIM	Global Geospatial Information Management, UN Initiative
UT	Universal Time
UTC	Universal Time Coordinated
VGOS	VLBI2010 Global Observing System
VLBI	Very Long Baseline Interferometrie
VTEC	Vertical Total Electron Content
WATS	Wettzell Atmospheric State Modell
WATSON	WATS On-line
WLRS	Wettzell Laser Ranging System