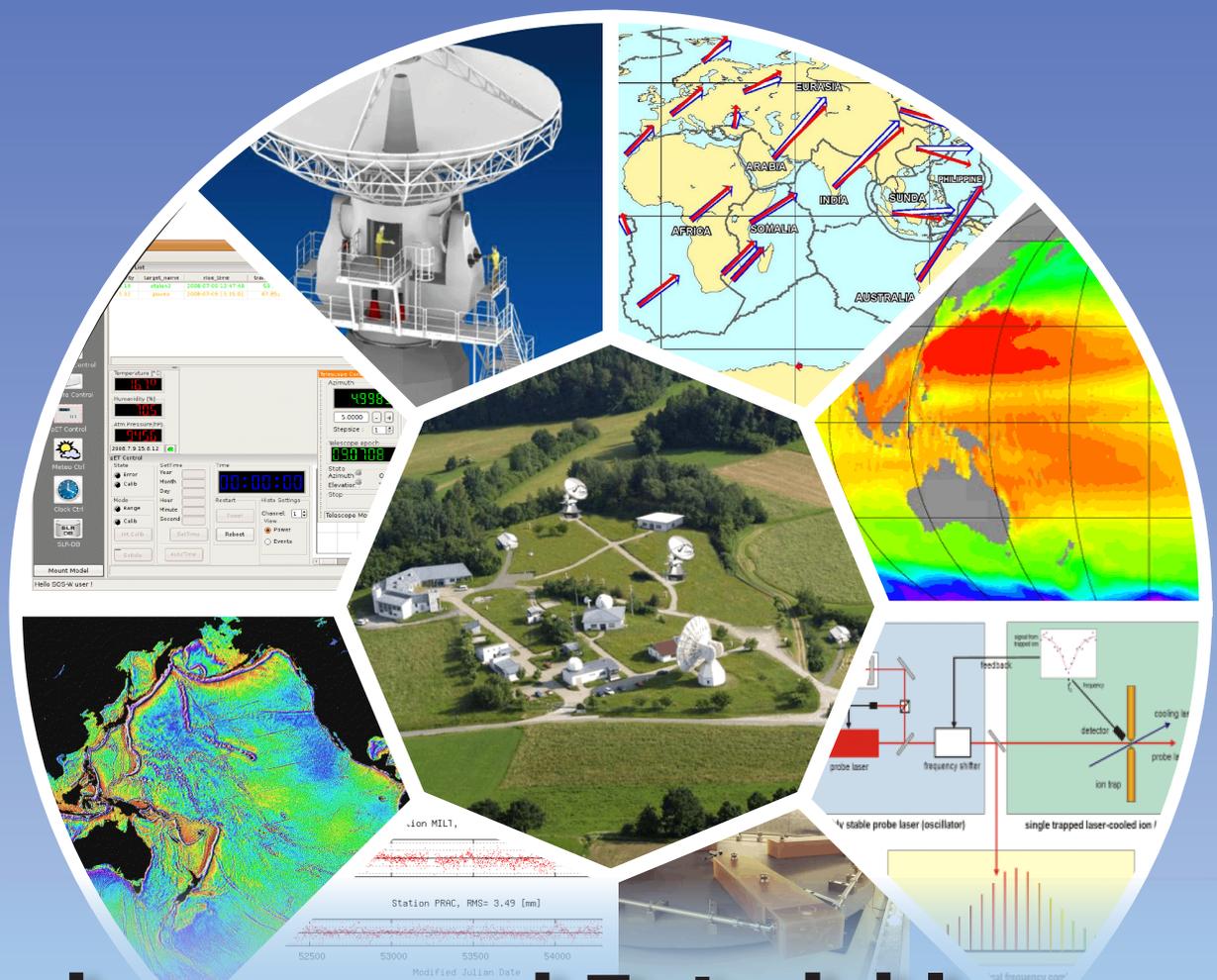
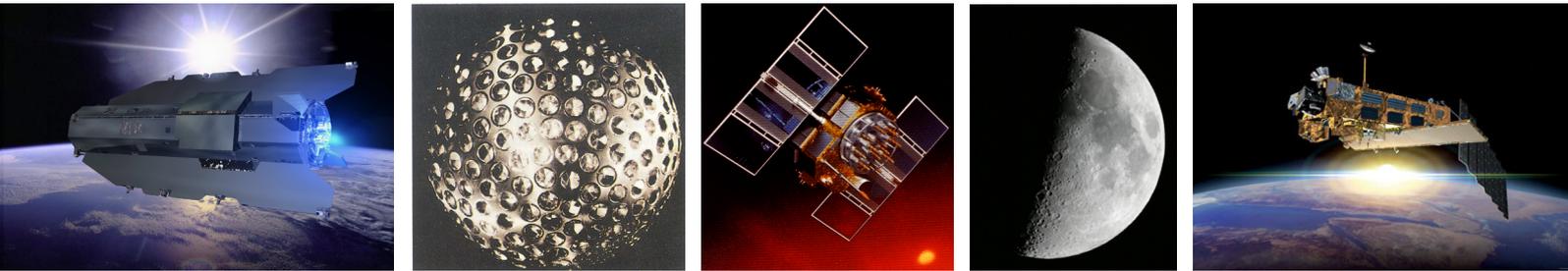


FORSCHUNGS- GRUPPE SATELLITEN- GEODÄSIE



Forschungs- und Entwicklungs- programm 2011 - 2015

**Forschungsgruppe Satellitengeodäsie
FGS**

**Forschungs- und Entwicklungsprogramm
2011 – 2015**

**München, Frankfurt, Bonn
Juni 2010**

Abbildungen auf der Titelseite:

Obere Reihe von links: GOCE, Lageos, GNSS, Mond, Altimetersatellit

Rosette Mitte: Gedätisches Observatorium Wettzell mit TWIN Teleskop (Simulation)

Vorwort

Das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsprogramm legt Ziele und Forschungsaufgaben der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) für die Jahre 2011 bis 2015 dar. In wesentlichen Teilen schreibt es das Programm der Jahre 2006 bis 2010 fort. Im Fokus der geplanten Arbeiten stehen auch in der neuen Begutachtungsperiode die im Rahmen der FGS betriebenen geodätischen Observatorien. Neben der Weiterentwicklung der Messsysteme und der Erfassung hochwertiger Messdaten ist die geodätische und geowissenschaftliche Nutzung dieser Messungen eine zentrale Komponente des vorliegenden Programms. Mit den Forschungsarbeiten soll ein Beitrag geleistet werden zur Bereitstellung eines konsistenten und genauen Systems von Bezugsrahmen, einerseits als Grundlage für alle Geoinformationssysteme und andererseits als metrologische Grundlage der Prozesse des globalen Wandels. Der geodätische Beitrag zur Erfassung und Erforschung des "Systems Erde" und zum Aufbau des "Global Geodetic Observing Systems" der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) ist ein Angelpunkt des Forschungsprogramms. Zeitmessung ist die Grundlage jeder geodätischen Messung. Die rasante Entwicklung hochstabiler Uhren wird damit die Geodäsie wesentlich beeinflussen. Die Bedeutung von Zeit und Frequenz in der Geodäsie ist konsequenterweise ein weiteres zentrales Thema der neuen Berichtsperiode. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der FGS orientieren sich an den internationalen Entwicklungen und werden in internationale Programme und wissenschaftliche Dienste eingebunden.

In der Berichtsperiode sind mehrere wichtige personelle Änderungen erfolgt. Im Juni 2008 ist Dr. Wolfgang Schlüter, langjähriger Leiter des Geodätischen Observatoriums in den wohlverdienten Ruhestand getreten. Er hat das Observatorium seit Februar 1990 geführt und den Aufbau und die Weiterentwicklung des Observatoriums seit der Pionierzeit entscheidend geprägt. Für die Forschungsprogramme der zurückliegenden Jahre hat er immer wieder wichtige Impulse geliefert. Im Jahre 2006 hat Prof. Urs Hugentobler die Leitung der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der TU München und des Fachbiets Satellitengeodäsie des Instituts für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG) als Nachfolger von Prof. Markus Rothacher übernommen. Seit 2008 ist er der Sprecher der FGS. Zu Beginn des Jahres 2010, schließlich, hat Prof. Roland Pail die Nachfolge von Prof. Rummel als Leiter des IAPG und des Lehrstuhls für Astronomische und Physikalische Geodäsie angetreten. Prof. Reiner Rummel, langjähriger Leiter des IAPG und Lehrstuhlinhaber sowie langjähriger Sprecher der FGS über viele Jahre, hat mit seinem Weitblick und mit dem Stellen der zentralen Fragen das Programm und die Ziele der FGS entscheidend geprägt. Herr Rummel ist seit 2007 Fellow des "TUM Institute for Advanced Study" (IAS). Bis zu seinem Rücktritt wird er sich befreit von bürokratischen Belastungen des typischen Universitätsalltags der Spitzenforschung widmen können. Wir freuen uns, dass er die FGS in dieser Funktion weiterhin mit Rat und Tat begleitet.

Weitere Änderungen sind in der neuen Berichtsperiode absehbar. Ende 2010 wird Prof. Hermann Drewes als langjähriger Direktor des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI) in den verdienten Ruhestand treten. Sein Nachfolger wird im Rahmen einer Neustrukturierung der "geodätischen Landschaft" in München als Professor der TUM berufen werden. Zur Implementierung der Empfehlungen

des Wissenschaftsrates, welche aus der Begutachtung des DGFI von 2005 resultierten, sind die Arbeiten am Aufbau eines "Centrums für geodätische Erdsystemforschung" (CGE) in vollem Gange. Mit dem Zusammenschluss von DGFI, IAPG, FESG sowie der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung (BEK) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (BAdW) im CGE werden die Forschungsarbeiten der vier Institutionen in einem gemeinsamen Forschungsprogramm koordiniert. Dadurch werden weitere Synergien auch für die FGS realisiert werden. Administrativ und organisatorisch behalten die am CGE beteiligten Institutionen ihre Unabhängigkeit, so dass die Struktur der FGS unangetastet bleibt.

Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie ist für die anhaltend hohe Förderbereitschaft der zuständigen Ministerien des Bundes und der Länder dankbar, 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 2010

Urs Hugentobler

- Sprecher -

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	5
Zusammenfassung	9
1 Forschungsprogramm der FGS – Rückblick und Ziele	13
1.1 Globales Geodätisches Beobachtungssystem	13
1.2 Geodätische Raumverfahren – Beobachtungsbeiträge FGS	14
1.3 Einbindung der Arbeiten der FGS in die operationellen Dienste der IAG	18
1.4 Zeit und Frequenz	19
1.5 Neue Generation Schwerefeldsatellitenmissionen	21
1.6 Geodäsie und Erdsystemforschung	21
2 Messsysteme der FGS	23
2.1 Die geodätischen Observatorien der FGS	23
2.2 Zeit und Frequenz	25
2.2.1 Zeithaltung	25
2.2.2 Einwegstreckenmessung (Transponder)	25
2.2.3 Der G Ringlaser als optischer Resonator höchster Güte (Pilotprojekt)	27
2.2.4 Optische Uhren	28
2.2.5 Zielstellungen Zeit und Frequenz	28
2.3 VLBI	29
2.3.1 Stand der Arbeiten	29
2.3.2 Das 20m Radioteleskop	31
2.3.3 Das Twin Radioteleskop	31
2.3.4 TIGO	32
2.3.5 O'Higgins	32
2.3.6 Variationen der mechanischen und elektrischen VLBI-Referenzpunkte (Pilotprojekt)	32
2.3.7 Korrelator	32
2.3.8 Zielstellungen für VLBI	34
2.4 Laserdistanzmessung	36
2.4.1 Stand der Arbeiten	36
2.4.2 Das Wettzell Laser Ranging System (WLRS)	36
2.4.3 Das Satellite Observing System Wettzell (SOS-W)	37
2.4.4 TIGO SLR	38
2.4.5 Einwegstreckenmessung mit Transponder	38
2.4.6 Neue Anwendungen der Lasertechniken (Pilotprojekt)	38
2.4.7 Zielstellungen Laserdistanzmessung	39
2.5 GNSS Beobachtungsstationen	40
2.5.1 Stand der Arbeiten	40
2.5.2 Zielstellungen GNSS	40
2.6 Gravimetrie	41
2.6.1 Wettzell	41
2.6.2 TIGO	43
2.6.3 Weiterentwicklung von gravimetrischen Korrekturmodellen	43
2.6.4 Zielstellungen	45
2.7 Ringlaser	45
2.7.1 Stand der Arbeiten	46
2.7.2 Integration der Ringlaserbeobachtungen in die Analyse vom VLBI	48

2.7.3	Injection Locking großer Ringlaser	48
2.7.4	Ringlaser Signalkorrelation.....	49
2.7.5	Alternative Rotationssensorkonzepte	49
2.7.6	Zielstellungen Ringlaser	50
2.8	Messung lokaler Effekte	50
2.8.1	Neigungsmessungen	50
2.8.2	Hydrologische Messungen	51
2.8.3	Meteorologische Messungen.....	53
2.8.4	Seismologische Aufzeichnungen.....	54
2.8.5	Lokale Vermessung	55
2.8.6	Zielstellungen.....	56
2.9	Automatisierung Systemsteuerung	57
2.9.1	Stand der Arbeiten	57
2.9.2	Aktualisierung der IT Komponenten und LAN Struktur der Station Wettzell	58
2.9.3	Erhöhung der Internet Anschlusskapazität.....	59
2.9.4	Erhöhung der Automatisierung der Messsysteme	59
2.9.5	Aufbau eines Entwurfsmusters für „Data Acquisition“ Systeme (Pilotprojekt)	60
2.9.6	Zielstellungen Automatisierung Systemsteuerung	60
2.10	Zusammenfassung der Ziele	61
3	Informationstechnologie, Datenaufbereitung und -archivierung	67
3.1	Möglichkeiten einer echtzeitnahen VLBI-Korrelation.....	67
3.2	Datenhaltung und Informationsgewinnung	70
3.2.1	Erweiterung des IERS Daten und Informationssystems (IERS DIS)	71
3.2.2	Erstellung eines GGOS Portals	72
3.2.3	FGS Methodenbank, Verknüpfung der geodätisch-geophysikalischen Zeitreihen mit Modellen zur Erdrotation	76
3.2.4	AGrav - eine internationale Datenbank für Absolutschweremessungen	77
3.2.5	OpenADB, ein offenes Webportal für Altimeterdaten	80
3.2.6	Metadatenkatalog	81
3.2.7	Datenhaltung von Zeitreihen (Pilotprojekt)	84
3.3	Tabellarische Zusammenfassung der Ziele	84
4	Methodische Grundlagen und Verfahren	87
4.1	Geodätische Punktfelder	88
4.2	Orientierung und Rotation der Erde.....	97
4.3	Meeresoberfläche	99
4.4	Schwerefeld	106
4.4.1	Satellitengravimetrie	106
4.4.2	Terrestrische Gravimetrie	112
4.4.3	Multi-Skalen-Darstellung des Schwerefeldes	114
4.4.4	Höhensysteme.....	115
4.4.5	Forschungsziele.....	117
4.5	Tabellarische Zusammenfassung der Ziele	118
5	Verbindung mit Erdwissenschaften (Erdsystemforschung).....	123
5.1	Geophysikalische Hintergrundmodelle	124
5.2	Atmosphäre	126
5.3	Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde	127
5.4	Erdrotation	131
5.4.1	DFG Forschergruppe Erdrotation und globale dynamische Prozesse	131
5.4.2	Dynamisches Erdsystemmodell	132
6	Beteiligung der FGS an den internationalen Diensten	135

7	Verantwortungsbereiche innerhalb der FGS	137
8	Haushaltmäßige Sicherung des Programms	139
9	Zitierte Literatur	145
10	Häufig verwendete Abkürzungen.....	153

Zusammenfassung

Die Geodäsie hat die Aufgabe, die Figur der Erde in Raum und Zeit, die Orientierung des Erdkörpers im Raum und das Schwerfeld der Erde mit höchster Genauigkeit zu bestimmen. Das Ziel ist die Kombination dieser drei Aspekte zu einem konsistenten Erdmodell. Dies erfordert neben der Weiterentwicklung der Messinstrumente und -methoden auch die Weiterentwicklung der Datenanalysemethoden und -strategien sowie der theoretischen Grundlagen und Methodik zur modellmäßigen Beschreibung der Systemkomponenten und deren Kopplung.

Das Forschungsprogramm der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) orientiert sich an dieser übergeordneten Zielsetzung. Die FGS soll damit einen maßgeblichen Beitrag zum Aufbau des "Global Geodetic Observing Systems" (GGOS) der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) leisten. Zentrale geodätische Aufgabe ist die Realisierung und der Unterhalt eines langzeitstabilen Bezugsrahmens in Lage und Höhe als metrologische Grundlage zur Beschreibung und Interpretation von Massentransportphänomenen im System Erde und der assoziierten Deformationen der Erdgestalt und Variationen der Erdrotation. Damit leistet die Geodäsie einen grundlegenden Beitrag zur Erfassung der gesellschaftlich sehr relevanten Prozesse des globalen Wandels. Ohne enge Kontakte und Interaktion mit den Erdwissenschaften – Geophysik, Ozeanologie, Atmosphärenphysik, Glaziologie, Hydrologie – kann diese Aufgabe nicht mit der erforderlichen Tiefe verfolgt werden. Der Kontakt zu den geowissenschaftlichen Nachbardisziplinen hat bereits im vergangenen FGS-Programm eine wichtige Rolle gespielt und soll in der neuen Berichtsperiode weiter intensiviert werden.

Zeit- und Frequenzmessung bildet die Grundlage fast jeder geodätischen Messung. Durch die rasante Entwicklung immer stabilerer Frequenznormale werden sich neuartige geodätische Messverfahren ergeben. Die FGS wird sich im Zeitraum 2011-2015 damit auch der Rolle der Zeit- und Frequenzmessung in der Geodäsie der Zukunft sowie der Weiterentwicklung der geodätischen Verfahren zum Zeit- und Frequenzvergleich über große Distanzen beschäftigen.

Die FGS will mit ihren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten signifikant beitragen, dass

- mit den Messdaten der kleinen Anzahl von Fundamentalstationen sowie mehreren Hundert weiterer über die Erde verteilten Beobachtungsstationen ein konsistenter langzeitstabiler Referenzrahmen geschaffen werden kann, der den Anforderungen zur Erfassung der Veränderungsprozesse im System Erde genügt,
- hochgenaue geodätische Beobachtungen und Produkte zur Überwachung von Naturgefahren in Echtzeit und hoher zeitlicher Auflösung zur Verfügung stehen durch weitere Automatisierung der Messsysteme, durch schnellen Datentransport und automatisierte Datenanalyse,
- die Ergebnisse der Satellitenschwerfeldmissionen der globalen Geodäsie und den benachbarten Geodisziplinen zur Verfügung stehen zur Interpretation von Massentransportphänomenen im System Erde gemeinsam mit präzisen gravimetrischen Punktmessungen, geometrischen Deformationsmessungen und Messungen von Erdrotationsvariationen,
- neue theoretische und methodische Ansätze zur Datenmodellierung für die konsistente Kombination von Raum- und Schwerebezugssystemen zur Anwendung kommen.

Diese Ziele sollen erreicht werden über die folgenden Projekte:

- Ausbau und Weiterentwicklung der Messsysteme des Geodätischen Observatoriums in Wettzell. Über die Zukunft von TIGO kann zum Zeitpunkt der Begutachtung keine Aussage gemacht werden. Derzeit bemüht sich das BMI über die deutsche Botschaft in Chile darum, den Betrieb in Concepcion dadurch zu stabilisieren, dass ein von der chilenischen Regierung beauftragtes neues Konsortium TIGO übernimmt und weiterhin zu den IAG-Diensten beiträgt. In Wettzell werden gegenwärtig neue Messsysteme aufgebaut, mit welchen neuartige Beobachtungsszenarien implementiert werden können. Alle Systeme sollen an ein einheitliches Zeitsystem angebunden werden und es wird ein einheitliches Konzept zur Stationssteuerung und abgesicherten Fernsteuerung entwickelt und implementiert. Das Observatorium Wettzell bietet die einzigartige Möglichkeit, theoretische und methodische Erkenntnisse, welche sich innerhalb der FGS ergeben, direkt in die Messprozesse zurück zu koppeln. Spezifische Projekte sind formuliert für die einzelnen Beobachtungstechniken – VLBI-Beobachtungen, Laserdistanzmessungen, GNSS-Beobachtungen, Gravimetrie, Grossringlaser "G", sowie Grunddienste; siehe Kapitel 2.
- Datentransport und Datenhaltung: Anstrengungen werden weitergeführt, Daten der Messsysteme in Echtzeit zu den Datenzentren resp. zum Korrelator zu transportieren. Daten und Produkte werden unter Anwendung internationaler Standards und neuer Technologien über Web-Informationssysteme den Nutzern bereitgestellt. Es werden hierzu neuartige Konzepte für den raschen Zugriff und interaktive Visualisierung/Bearbeitung der Zeitserien entwickelt und implementiert; siehe Kapitel 3.
- Geodätische Punktfelder: Optimierte Konzepte und Strategien zur konsistenten Kombination der Verfahren zur Bereitstellung langzeitstabiler Referenzrahmen werden weiter ausgearbeitet. Insbesondere soll auch das Potential der Kombination auf Beobachtungsstufe untersucht werden. Alle Fehlereinflüsse auf die gesamten Messvorgänge, werden weiter untersucht. Als wichtiges Hilfsmittel steht die Kapazität zur Reanalyse der gesamten Beobachtungsdatensätze zur Verfügung. Die echtzeitnahe Parameterschätzung mittels GNSS-Beobachtungsdaten soll die Bereitstellung von Produkten in Echtzeit erlauben. Schließlich wird sich die FGS auch mit der Integration neuer Navigationssysteme in die Messprozesse beschäftigen; siehe Abschnitt 4.1.
- Orientierung der Erde: Genauigkeit und Langzeitstabilität der Erdrotationsparameter sowie die Qualität hochaufgelöster Erdrotationsparameter soll durch optimale Parametrisierung und konsistente Kombination von VLBI, GNSS und Grossringlaser verbessert werden. Mittels automatisierter Analysetools soll die Latenzzeit zur Bereitstellung von Erdrotationsparametern reduziert werden; siehe Abschnitt 4.2.
- Meeresoberfläche: Analyse und Beschreibung der Kinematik des Meeresspiegels im regionalen und globalen Maßstab und Vergleiche mit langjährigen Pegelmessungen. Verbesserung der empirischen Zeitanalyse durch verbesserte Trennung von Partialtiden anhand langer Zeitreihen und Daten neuer Missionen. Untersuchungen zur Abschätzung des sterischen Effekts. Kombination von Satellitenschwerefelddaten mit Daten der Satellitenaltimetrie; siehe Abschnitt 4.3.
- Schwerefeld: Die Verarbeitung der Daten des Satelliten GOCE wird einen Schwerpunkt der Arbeiten bilden. Grundlegend für die Berechnung globaler Schwerefelder ist eine detaillierte Analyse aller Prozessierungsschritte der Verarbeitungskette und ein vertieftes Verständnis in Theorie und Anwendung der verschiedenen Sensoren zur Beobachtung des Schwerefeldes. Zur Berechnung hochauflösender regionaler und globaler Schwerefeldmodelle wird die Methodolo-

gie zum Vergleich und Kombination von Schwerfelddaten verschiedener Missionen und terrestrischer Messungen weiterentwickelt. Schließlich werden Anwendungsstrategien in den Bereichen Höhenreferenzsysteme, Ozeanströmungssystemen, kontinentaler Hydrologie ausgearbeitet. Die FGS beteiligt sich am Aufbau eines globalen Schwerereferenzsystems. Es werden Methoden und Modellansätze zur Ableitung der Schwerfeldmodelle weiterentwickelt, welche eine rigorose Kombination aller Beobachtungsgrößen erlauben; siehe Abschnitt 4.4.

- Verbindung mit den Erdwissenschaften: Vielfältige Beziehungen zu benachbarten Geodisziplinen sollen weiter verstärkt werden zur Förderung des Verständnisses der verwendeten Hintergrundmodelle, zur Sicherstellung deren Konsistenz untereinander, aber auch zur Berechnung und Bereitstellung von Modellen wie, z.B. aus geodätischen Beobachtungen abgeleitete vertikal aufgelöste 4D-Modelle der ionosphärischen Elektronenverteilung. Zur Bilanzierung von Massentransportphänomenen aus Schwerfeldmessungen und Variationen der Erdrotation ist die Zusammenarbeit mit den Erdwissenschaften unerlässlich, siehe Kapitel 5.
- Beteiligung an den internationalen Diensten: Die FGS beteiligt sich wie bereits in den Vorjahren in beträchtlichen Rahmen an den internationalen wissenschaftlichen Diensten der IAG. Auch hier ergibt sich eine direkte Wechselwirkung zwischen Bereitstellung und Nutzung der Beobachtungsdaten. Die Beteiligungen von FGS Partnern an den IAG Diensten sind in Kapitel 6 aufgeführt.

Die einzelnen Kapitel beginnen jeweils mit der Darlegung der grundlegenden Zielstellungen der entsprechenden Thematik. Sie führen ein in den gegenwärtigen Stand der Arbeiten unter Bezugnahme auf das Forschungs- und Entwicklungsprogramm der Jahre 2005-2010 und erläutern die Ziele für die nächste Berichtsperiode. Die Zielstellungen sind am Ende jedes Themenblockes zusammengefasst. Zur besseren Übersichtlichkeit sind jeweils Ziele und Aufgaben am Ende jedes Kapitels tabellarisch zusammengestellt.

Die Tabellen listen auch geplante Pilotprojekte auf, d.h., Projekte, welche auf neuartigen Technologien beruhen und welche zukünftige Entwicklungen vorbereiten sollen:

- Verwendung des Großringlasers als optischen Resonator höchster Güte, siehe Abschnitt 2.2.3.
- Untersuchung der Veränderungen von mechanischem und elektrischem Referenzpunkt bei VLBI, siehe Abschnitt 2.3.6.
- Neue Entwicklungen in Anwendungen von Laser-Techniken, siehe Abschnitt 2.4.6.
- Entwicklung eines einheitlichen Entwurfsmusters für Datenerfassungs- und Verwaltungssysteme, siehe Abschnitt 2.9.5.
- Effiziente Speicherung von und optimierter Zugriff auf geodätische Zeitreihen, siehe Abschnitt 3.2.7.

Kapitel 7 definiert die Verantwortungsbereiche innerhalb der FGS und die administrative Einbindung der einzelnen Institutionen und Kapitel 8 listet die laufenden und beantragten sowie die in der letzten Berichtsperiode abgelaufenen Drittmittelprojekte auf. Kapitel 9 und 10 schließlich listet die zitierte Literatur und gibt ein Verzeichnis der häufig verwendeten Abkürzungen.

1 Forschungsprogramm der FGS – Rückblick und Ziele

Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie ist die Nachfolgeorganisation des 1970 gegründeten DFG Sonderforschungsbereich 78 (SFB 78), dessen zwei Teilprojekte einerseits die Gewinnung und Aufbereitung von Satellitenbeobachtungen und andererseits die geodätische Nutzung von Satellitenbeobachtungen gewidmet waren. Von Anfang an wurde eine enge Verzahnung der Forschungsarbeiten im Bereich der Mess- und Beobachtungsverfahren mit denjenigen zur Modellentwicklung und zur geodätischen Nutzung der Messdaten angestrebt (Schneider, 1990). Am 1. Juli 1983 wurde der Sonderforschungsbereich in die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie als Dauereinrichtung übergeführt. Gemäß Satzung umfasst die Aufgaben der FGS Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Satellitengeodäsie unter besonderer Berücksichtigung der Geodynamik und insbesondere den Betrieb des Geodätischen Observatoriums Wettzell sowie den weiteren Ausbau der Station.

Die ursprüngliche Zielsetzung hat sich seit der Einrichtung des SFB 78 nicht grundsätzlich geändert, hat sich aber der rasanten Entwicklung der geodätischen Messmethoden und deren Nutzung stetig angepasst und signifikante Beiträge geliefert. Das geodätische Observatorium nimmt unter den Fundamentalstationen eine herausragende Rolle ein. Dies wird unter anderem verdeutlicht durch den Aufbau neuer Messsysteme wie der Twin-Radioteleskope und des Satellite Observing Systems Wettzell (SOS-W) oder durch den Betrieb des einzigartigen Großringlasers. Ebenfalls ein Meilenstein in der Geschichte der FGS ist das im April 2002 in Concepción, Chile, in Betrieb genommene geodätische Observatorium TIGO (Transportables Integriertes Geodätisches Observatorium). Zusammen mit dem Observatorium O'Higgins auf der antarktischen Halbinsel betreibt die FGS damit den Prototypen eines globalen geodätischen Beobachtungssystems.

1.1 Globales Geodätisches Beobachtungssystem

Entscheidende Impulse für den Aufbau des globalen geodätischen Beobachtungssystems (GGOS) (Plag und Pearlman, 2009, Drewes, 2007) sind von der FGS ausgegangen (Rummel et al., 2000). GGOS wurde 2007 am IUGG-Symposium in Perugia als Komponente der IAG etabliert als Beitrag der Geodäsie zur Erdsystemforschung. Ausgangspunkt ist die Erkenntnis, dass eine weitergehende Integration der geodätischen Techniken und Methoden zwingend erforderlich ist, um die langzeitstabile metrologische Basis auf einem Genauigkeitsniveau bereitzustellen, welche zum vertieften Verständnis der im System Erde ablaufenden Veränderungsprozesse nötig ist. Der Grundgedanke ist die konsistente Verknüpfung der drei geodätischen Pfeiler, der Vermessung von Form, Rotation und Schwerfeld der Erde sowie deren zeitlichen Variationen, 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.

Mit der Möglichkeit, Massentransportphänomene mit neuartigen Satellitenmissionen global quantitativ zu erfassen, haben sich die Ziele der Geodäsie gewandelt. Die Geodäsie spielt heute eine bedeutende Rolle in der Erdsystemforschung. Sie stellt mit den geodätischen Raumverfahren, den neuen Schwerfeld-Satellitenmissionen, einer Konstellation von Altimetersatelliten, aber auch mit terrestrischen Gravimetern das Instrumentarium bereit für die Metrologie der Prozesse des globalen Wandels. Dabei beschränkt sich die Aufgabe der Geodäsie nicht auf die Messdatenerfassung, sondern umfasst auch die Datenanalyse und Methoden-

entwicklung und, in Zusammenarbeit mit Geophysik, Glaziologie, Ozeanographie und Hydrologie, auch die Modellierung und Interpretation.

Die FGS sieht ihr Forschungsprogramm eingebettet in den Gesamtrahmen der Erforschung des Erdsystems. Tatsächlich kann die FGS gesehen werden als ein Prototyp für ein globales geodätisches Beobachtungssystem: Signifikante Beiträge zur geodätischen Datenerfassung im globalen Rahmen werden durch die im Rahmen der FGS betriebenen geodätischen Observatorien in Wettzell, Concepción und O'Higgins geleistet. Diese Beiträge werden begleitet durch eine maßgebliche Beteiligung der FGS an den wissenschaftlichen Diensten der IAG. Die wissenschaftliche Nutzung ist eingebettet in interdisziplinäre Programme. Zu erwähnen sind beispielsweise das DFG Schwerpunktprogramm "Massentransporte und Massenverteilung im System Erde" (SPP1257), der Geotechnologien-Forschungsschwerpunkt „Erfassung des Systems Erde aus dem Weltraum III“ und die DFG Forschergruppe Erdrotation, zu welchen die FGS namhafte Beiträge liefert.

Geodätische Beobachtungen tragen zur Erdsystemforschung in zweierlei Hinsicht bei, einerseits durch das Bereitstellen von hochpräzisen und langzeitstabilen Bezugssystemen in Lage und Höhe, in welchem Erdbeobachtungen referenziert werden können, andererseits durch präzise Messungen in gesellschaftlich relevanten Bereichen des globalen Wasser- und Eishaushalts, der Dynamik von Atmosphäre und Ozeanen, von Naturgefahren und Naturkatastrophen. GGOS trägt daher wesentlich bei zu einer Reihe von Themen, welche von der Group on Earth Observation (GEO) als Bereiche für den sozioökonomische Nutzen ("Societal Benefit Areas") definiert wurden und trägt damit zum Aufbau des Global Earth Observation System of Systems bei. Unabdingbar ist dabei die Sicherstellung des Austausches von 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 GMES (Global Monitoring of Environment and Security) und INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) zu nennen.

Ohne stärkere Einbindung der am Betrieb der IAG Komponenten beteiligten nationalen Institutionen und Agenturen der Betrieb sowohl der geodätischen Observatorien und Messgeräte als auch der wissenschaftlichen Dienste der IAG nicht nachhaltig gesichert ist. Die Erkenntnis hat – wiederum angeregt durch Exponenten der FGS – zur Frankfurter Konferenz von Vertretern dieser Institutionen am 2./3. November 2009 geführt, an welcher der Aufbau eines GGOS Intergovernmental Committee (GIC) initiiert wurde. Ziel ist, mittels geeigneter zwischenstaatlicher Übereinkünfte die Planung und nachhaltige Sicherung der globalen geodätischen Infrastruktur sicherzustellen sowie GGOS durch Vertretungen in überstaatlichen Institutionen zu unterstützen.

1.2 Geodätische Raumverfahren – Beobachtungsbeiträge FGS

Grundlage zur Referenzierung der geodätischen Messgrößen ist die Verfügbarkeit eines langzeitstabilen erdfesten Referenzrahmens, der mithilfe der geodätischen Raumverfahren mit einer Genauigkeit von einem Millimeter (Relativgenauigkeit besser als 10^{-9} bezogen auf den Erdradius) bereitzustellen ist. Zur Beobachtung integraler Effekte von Massenverlagerungen in der Erdrotation und zur präzisen Bahnbestimmung von Satelliten als Grundlage zur Vermessung der Ozeanoberfläche und des Gravitationsfeldes der Erde ist eine langzeitstabile Verfügbarkeit auch des raumfesten Bezugsrahmens und der präzisen Kenntnis der Transformation zwischen erdfestem und raumfestem Bezugssystem unerlässlich.

Die von GGOS gesteckten Ziele lassen sich nur durch eine konsistente Integration der Messverfahren in ein einheitliches Beobachtungssystem verwirklichen. Nur dadurch können die spezifischen Stärken der einzelnen Verfahren optimal in kombinierte Produkte eingebracht werden. Die Integration hat dabei parallel auf Beobachtungs- wie Analyselevel zu erfolgen. Die Beobachtungsgeräte müssen gleichsam als globales Großinstrument betrieben werden, was eine weitgehende Koordination innerhalb und zwischen den einzelnen Techniken erforderlich macht. Die Beobachtungszeitserien müssen ununterbrochen und verfügbar sein. Zukünftig werden auch neuartige Messtechniken wie Laser-Transpondermessungen oder differenzielle VLBI-Messungen zu Zielen auf dem Mond und im interplanetaren Raum oder Inertialsensoren einbezogen werden. Von grundlegender Wichtigkeit sind Verknüpfungsmessungen ("local ties") zwischen den einzelnen Techniken. Hierzu sind geodätische Fundamentalobservatorien unerlässlich, welche unterschiedliche Beobachtungstechniken an einem Ort vereinen, wie sie von der FGS betrieben werden. In Zukunft werden auch Verknüpfungsmessungen im Raum möglich werden durch Beobachtung von GNSS Satelliten mit VLBI-Teleskopen und ko-lokierten Sensoren bzw. Sendern auf künstlichen Erdsatelliten oder auf dem Mond. Die Integration wird schließlich Sensoren und Signalquellen auf der Erdoberfläche, im erdnahen wie im fernen Weltraum bis zu den Quasaren am Rande des beobachtbaren Universums einschließen.

Beobachtungstechniken

Die FGS betreibt mit Messsystemen an den drei Standorten Wettzell, Concepción und O'Higgins sowie an weiteren, global verteilten GNSS-Messstationen ein globales geodätisches Beobachtungssystem im Kleinen und hat damit eine sichtbare Vorbildfunktion für GGOS. Die Messeinrichtungen werden laufend instand gehalten, weiterentwickelt und ausgebaut. Besonders erwähnt werden kann das neue Satelliten-Laserdistanzmesssystem SOS-W, das sich gegenwärtig in der Testphase befindet sowie die zwei im Bau befindlichen 13-m Twin-Radioteleskope in Wettzell, aber auch die Installation global verteilter Galileo-tauglicher GNSS-Empfänger. Erwähnenswert sind auch die laufenden Entwicklungen zur Systemüberwachung, Automatisierung und abgesicherten Fernsteuerung der Messaufgaben sowie der Datenhaltung über die einzelnen Messsysteme hinweg. Ziel ist die Steuerung der einzelnen Geräte als Messprozesse eines Gesamtsystems, letztlich auch unter Einbezug der Stationen an den verschiedenen Standorten. Damit wird der Gedanke von GGOS auch informations- und steuerungstechnisch als Prototyp realisiert.

Betreffend der einzelnen durch die FGS betriebenen Messtechniken ergibt sich das folgende Bild (detaillierte Berichte siehe Kapitel 2):

VLBI. Mit dem 20m-Radioteleskop in Wettzell nehmen BKG und FESG an allen IVS-Beobachtungsprogrammen der IAG teil. Aufgrund seiner exponierten Lage nimmt das 9m-Radioteleskop in O'Higgins auf der Antarktishalbinsel, das in Kooperation mit dem DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) betrieben wird, mit zwei Kampagnen jährlich an den Messsessionen teil. Die beiden Stationen auf der Südhalbkugel helfen entscheidend die ungleichmäßige geographische Verteilung der IVS-Observatorien zu verbessern. Die Teleskope beteiligen sich regelmäßig zweimal wöchentlich an Beobachtungssessionen zur Bestimmung der Erdorientierungsparameter sowie täglich an den einstündigen INTENSIVE-Sessionen zur Bestimmung der UT1-UTC-Parameter der Erdrotation mit täglicher Auflösung. Teilnahme an speziellen Messsessionen wie an den Beobachtungen der japanischen Mondsonde SELENE/Kamaguya mit dem Teleskop in Wettzell demonstrieren das Interesse und die technischen Möglichkeiten, an neuartigen zukunftsgerichteten Messprojekten mitzuwirken. Die Auslastung der Teleskope der FGS ist sehr hoch und

das Radioteleskop in Wettzell kann mittlerweile eine 27-jährige praktisch ununterbrochene Messzeitreihe vorweisen. Grundlage ist eine kompromisslose Wartung der Großgeräte und deren kontinuierliche Anpassung an neue technologische Entwicklungen.

- An den Radioteleskopen werden die Daten momentan mit dem MK-5b-System aufgezeichnet. Ein Digital Baseband Converter (DBBC) wird in Wettzell unter realistischen Bedingungen getestet. Ziel ist der Ersatz der analogen Filter und Bandkonverter durch die neue digitale Technik, sobald deren Kinderkrankheiten überwunden sind. Routinemäßig werden heute die Messdaten ausgewählter Sessions in naher Echtzeit per Internet an die Korrelatoren in Bonn und Japan übertragen.
- Die FGS beteiligt sich maßgeblich am Korrelator, der gemeinsam mit dem Max Planck Institut für Radioastronomie in Bonn betrieben wird. Entwicklungen werden angegangen in Bezug auf Automatisierung des Korrelatorbetriebs, insbesondere in Hinblick auf vermehrten Einsatz für e-VLBI. Mit Unterstützung der FGS wurde am MPIfR ein Rechner-Cluster für einen Softwarekorrelator beschafft.
- Eine Hauptaufgabe in der neuen Berichtsperiode wird die Inbetriebnahme der beiden neuen Radioteleskope im Twin-Teleskop-Wettzell Projekt sein. Die Auslegung der neuen Teleskope auf VLBI2010, des neuen Konzepts für VLBI, an dessen Ausarbeitung sich die FGS maßgeblich beteiligt hat, erfordert Tests neuer Technologien der Verstärker, Empfangshörner und Kryostaten. Parallel dazu werden neue Beobachtungskonzepte für den Einsatz der drei Teleskope in Wettzell entwickelt.

SLR/LLR. Am Geodätischen Observatorium Wettzell wird seit 1991 das Wettzell Laser Ranging System (WLRS) betrieben mit einer Produktivität von über 6000 gemessenen Passagen pro Jahr. Das Instrument befindet sich sowohl qualitativ als auch quantitativ in der Spitzengruppe der ILRS-Observatorien. Im Sommer 2008 wurde das neue Satellite Observing System Wettzell (SOS-W) installiert, welches sich gegenwärtig in der Testphase befindet. Während sich das neue Instrument auf tieffliegende Satelliten konzentrieren soll, wird das WLRS wieder für die Messung der Entfernung zu hochfliegenden Satelliten sowie zum Mond optimiert. Neben den Laser-Zweiwegdistanzmessungen wurden in der Berichtsperiode mehrere Experimente mit Einweg-Transpondermessungen gemacht. So wurden interplanetare Distanzmessversuche durch Zusammenschalten des WLRS mit einem aufmontierten Laser-Transponder simuliert, indem Laserpulse an geodätischen Erdsatelliten reflektiert wurden. Im Herbst 2009 wurden Einwegstrecken zum Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) der NASA mit dem WLRS gemessen. Mit der Möglichkeit, den Zeitpunkt ausgesendeter Laserpulse im 10 ps-Bereich im lokalen Zeitsystem zu registrieren liefert das WLRS wertvolle Beiträge zum Zeittransferexperiment T2L2 auf Jason-2. Im Auftrag von ASTRIUM wurde in Wettzell zudem am WLRS ein Test durchgeführt, welcher das Konzept des für den Einsatz auf der International Space Station (ISS) vorgesehenen ELT (European Laser Timetransfer) Experiments erfolgreich überprüfte. Das Experiment für optischen Zeittransfer zur Pharao-Uhr auf ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) wurde aus der FGS vorgeschlagen und von der ESA in das Baseline-Konzept von ACES aufgenommen und soll 2013 fliegen. Das Potential optischer Kommunikationsverbindungen als vielversprechende Distanzmessmethode über große Distanzen soll im Rahmen eines Pilotprojektes untersucht werden.

GNSS. Die FGS betreibt weltweit über 50 permanente GPS und kombinierte GPS/GLONASS Stationen. Die Beobachtungsdaten dieser und weiterer global verteilte Permanentstationen werden in Echtzeit über eine Infrastruktur verbreitet, welche am BKG aufgebaut wurde. Insgesamt

werden gegenwärtig Datenströme mit dem NTRIP-Protokoll von etwa 300 Stationen über verschiedene BKG-Broadcaster zur Verfügung gestellt. Seit 2009 werden an den drei von der FGS betriebenen geodätischen Observatorien auch Galileo-taugliche Geräte eingesetzt, welche ihre Daten in Echtzeit bereitstellen. Sie sind Teil des zusammen mit dem DLR aufgebauten CONGO (Cooperative Network for GIOVE Observation) Echtzeitnetzes, welches aus gegenwärtig zehn global verteilten Stationen besteht. Die Daten werden am IAPG routinemäßig mit dem Ziel verarbeitet, Erfahrung mit den neuen Datentypen, den systemspezifischen Biases sowie mit der stabilen Uhr von GIOVE-B zu gewinnen.

DORIS. Aufgrund von Interferenzen der DORIS-Sender mit dem VLBI-Betrieb ist gegenwärtig ein Einsatz von DORIS-Instrumenten an den geodätischen Observatorien der FGS nicht vorgesehen.

Gravimetrische Messungen. In Wettzell und Concepción stehen neben den Messgeräten der geometrischen Raumverfahren auch supraleitende Gravimeter im Betrieb, welche Schwerevariationen mit hoher Genauigkeit permanent aufzeichnen. Weitere supraleitende Gravimeter werden vom BKG in Bad Homburg und Medicina betrieben. Zur Gewährleistung der Langzeitstabilität werden an den selben Standorten regelmäßig Messungen mit Absolutgravimetern erfasst. Die Zeitreihe von Schweremessungen in Wettzell erstreckt sich bereits über mehr als 15 Jahre. Kontinuierliche gravimetrische Messungen bieten die einzige Möglichkeit, Massenverlagerungen direkt zu erfassen. Die Messungen werden u.a. eingesetzt zur kontinuierlichen Überwachung der zeitlichen Variationen des Schwerefeldes, zur Untersuchung von Eigenschwingungen des Erdkörpers, zur Validierung der Ergebnisse der Satellitengravimetriemissionen und zur Sicherung eines globalen Schwerereferenzsystems. Die Kombination mit den Zeitreihen der geometrischen Messverfahren erlaubt die Aufdeckung der Zusammenhänge zwischen Änderungen der Bezugssysteme, Umwelteinflüssen und Höhenvariationen. Zur Erfassung hydrologisch bedingter Schwerevariationen hat das GFZ Potsdam am Geodätischen Observatorium Wettzell in den Jahre 2008 und 2009 ausgedehnte hydrologische Messungen durchgeführt zur Erfassung von Zusatzinformationen wie des Grundwasserniveaus.

Großlaserkreisel. Am Großringlaser "G" wurden in der Berichtsperiode eine ganze Reihe von Verbesserungen implementiert, welche auf eine Verringerung des Messrauschens sowie auf eine Erhöhung der Langzeitstabilität hinzielten. Seit der Fertigstellung der letzten Neuerungen im Herbst 2009 liefert das Gerät Messzeitreihen, welche um eine Größenordnung stabiler und rauschärmer sind als vorher. So lässt sich nun beispielsweise die Chandler'sche Polbewegung im Signal nachweisen. Bereits vor diesen Verbesserungen zeigte die Kombination der Ringlaserbeobachtungen mit VLBI-Messungen im Rahmen der DFG-Forscherguppe "Erdrotation" das Potential des Großgerätes (Mendes et al., 2009). Mit den verbesserten Zeitreihen sollen innerhalb der FGS die Kombinationsanstrengungen mit VLBI fortgesetzt werden.

Insbesondere für das Testen der neuen Spiegel hat sich die Zusammenarbeit mit dem Department of Physics and Astronomy der University of Canterbury, Neuseeland, wiederum als sehr fruchtbar erwiesen. Das dortige Labor eignet sich hervorragend, um verschiedene Optionen zu überprüfen, bevor eine Änderung am "G"-Ringlaser implementiert wird. In Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe in Canterbury sollen weitere Verbesserungen wie das sogenannte Injection Locking untersucht werden.

Neben Signalen der Erdrotation zeigen sich in den Ringlasermessungen auch lokale Effekte. So konnte die Mikroseeismik, ein durch Wellen im atlantischen Ozean erzeugtes Hintergrundrauschen in Zusammenarbeit mit den Geophysikern am Erdmagnetischen Observatorium Fürstentfeldbruck

nachgewiesen werden. Im Rahmen der DFG-Forschergruppe werden anhand eines regionalen Finite-Elemente-Modells der Einfluss von Luftdruckvariationen und Windlast auf das Ringlasersignal untersucht. Der Geosensor wurde 2006 in Pinon Flat, Kalifornien installiert und ist in Zusammenarbeit mit dem Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, USA, und der LMU im Dauereinsatz, um die rotatorische Komponente von Erdbebenwellen zu messen, welche ein Ringlaser aufgrund seiner Unempfindlichkeit gegenüber translatorischen Beschleunigungen sehr gut beobachten kann.

Datenanalyse, Modellierung und Methodik

Die Integration auf Analyseebene, welche zum Erreichen der Ziele von GGOS nötig ist, erfordert homogene Standards und Reduktionsmodelle, eine einheitliche Parametrisierung und optimierte Kombinationsstrategien. Die Forderung nach homogen prozessierten Datensätzen fordert unmittelbar die Möglichkeit zur routinemäßigen Reprozessierung des gesamten Datenarchives, eine Kapazität, die innerhalb der FGS verfügbar ist und intensiv genutzt wird. Die FGS sieht es als ihre Aufgabe an, sowohl auf technologischer wie auch auf analytischer und methodischer Seite richtungsweisende Forschungs- und Entwicklungsbeiträge zu leisten.

Entwicklungen an einem einheitlichen Softwaresystem zur Verarbeitung der Beobachtungen aller raumgeodätischen Techniken sind innerhalb der FGS in Arbeit. Ziel ist nicht nur die Schaffung eines Werkzeuges, welches eine Analyse der Daten mit identischen Standards und Modellen für alle Techniken ermöglicht als Grundlage einer homogenen Kombination auf Normalgleichungsstufe zu schaffen, sondern auch die Möglichkeit zur Kombination auf Beobachtungsstufe, insbesondere auch von epochenspezifischen Parametern bietet. Damit werden beispielsweise Untersuchungen ermöglicht zur Kombination von Uhrkorrekturparametern für Messsysteme, welche durch dieselbe Uhr betrieben werden (VLBI und GNSS, aber auch DORIS).

1.3 Einbindung der Arbeiten der FGS in die operationellen Dienste der IAG

Die Programme der geodätischen Beobachtungsverfahren werden durch technikspezifische wissenschaftliche Dienste der IAG koordiniert. Diese Dienste – der IVS für VLBI, der ILRS für die Laserdistanzmessungen, der IGS für die GNSS-Beobachtungen, der IDS für DORIS und der IAS für die Altimetrie – koordinieren die Beobachtungsprogramme, sammeln und archivieren die Messreihen der Stationen, prozessieren die Beobachtungen und stellen ihre Produkte für die wissenschaftliche Nutzung zur Verfügung. Von besonderer Bedeutung ist der International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), ein gemeinsamer Dienst der IAG und der Internationalen Astronomischen Union (IAU), welcher als einer seiner Aufgaben die Produkte der technikspezifischen Dienste zu globalen terrestrischen und zälestischen Bezugssystemen zusammenführt.

Die international eingebürgerten Begriffe "Dienste" und "Produkte" können leicht im Sinne von "Dienstleistungen" verstanden werden. Bei den durch die IAG Dienste bereitgestellten Produkten handelt es sich jedoch um zentrale wissenschaftliche Resultate, welche laufend dem neuesten Stand von Wissenschaft und Forschung angepasst werden. Zwischen wissenschaftlicher Forschung und Diensten existiert tatsächlich eine wichtige wechselseitige Beziehung. Die stetige Weiterentwicklung und Verbesserung der Beobachtungstechniken, der Analysemethoden und der erforderlichen Modelle zur Bereitstellung von Produkten höchster Qualität durch die Dienste sowie die Untersuchung und Berücksichtigung von technikspezifischen Fehlerquellen sind fundamentale Forschungsaufgaben. Auf der anderen Seite sind die durch die Dienste generierten

Produkte direkter Ausgangspunkt für die Forschung. Der Vergleich, die Kombination und die wissenschaftliche Interpretation dieser Produkte führen zu einem vertieften Verständnis des Systems Erde. Diese Resultate stimulieren wiederum die Verbesserung und Verfeinerung der Beobachtungstechniken und Analysemethoden, was den in Abbildung 1.1 angedeuteten Kreis zwischen Forschung und Diensten schließt.

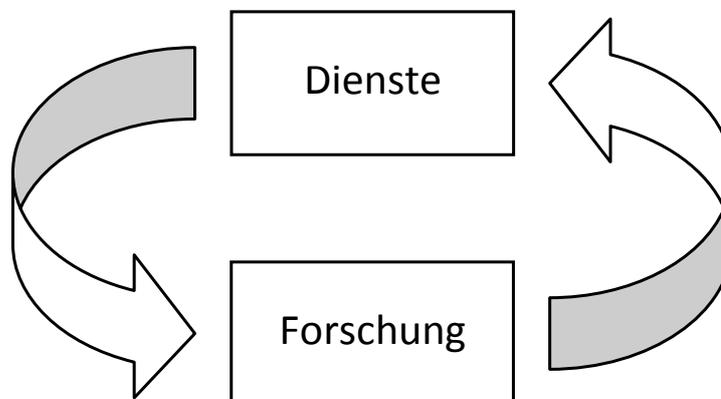


Abbildung 1.1: Wechselseitige Beziehung zwischen den Diensten und Forschung

Die FGS liefert nicht nur routinemäßig hochwertige Messreihen der Beobachtungssysteme an die technikspezifischen Dienste, die Mitglieder der FGS beteiligen sich auch maßgeblich an Ausrichtung, Organisation und Betrieb dieser Einrichtungen. Die FGS betreibt oder beteiligt sich an Datenzentren, Analysezentren und Kombinationszentren der verschiedenen Dienste und ist aktiv vertreten in Arbeitsgruppen und Leitungsgremien der IAG Dienste. Kapitel 6 führt diese Beteiligungen detailliert auf. Im Rahmen von GGOS wurden der FGS in der Berichtsperiode der Aufbau des Portals und die Installation des Büros für Standards und Konventionen (BSC) übertragen. Das Portal ist zentral für die Außendarstellung und Sichtbarkeit von GGOS und soll als primäre Anlaufstelle für sämtliche im Rahmen von GGOS bereitgestellten Daten und Produkte dienen. Diese Produkte sollen im Portal nicht zentral gespeichert werden, sondern beruhend auf dem sogenannten Clearinghouse-Konzept dezentral abgelegt werden. Das BSC überwacht die Verwendung konsistenter Standards und Konventionen bei der Berechnung der GGOS Produkte, schlägt nach Bedarf neue Standards vor und propagiert diese Standards und Konventionen in der weiteren wissenschaftlichen Gemeinschaft. Weitergeführt werden die Aktivitäten des innerhalb der FGS am BKG angesiedelten IERS Zentralbüros sowie der Betrieb des IERS Data and Information Systems, welches im Rahmen des Geotechnologienprogramms "Integration of space geodetic techniques and development of a user centre for the International Earth rotation and Reference systems Service (IERS)" aufgebaut wurde.

1.4 Zeit und Frequenz

Zeit und Frequenz spielen in der Geodäsie seit jeher eine zentrale Rolle. Die geometrischen Messverfahren beruhen alle auf der Messung von Signallaufzeiten und der Zuordnung von präzisen Messepochen in einer wohldefinierten Zeitskala. Mit der rasant verlaufenden Entwicklung von optischen Uhren wird in Zukunft die Messung von Potentialdifferenzen mittels hochstabiler Frequenzstandards möglich werden. Anfang 2010 hat das National Institut for Standards and Technology (NIST) Resultate publiziert, welche eine relative Frequenzunsicherheit einer Quantenlogik-uhr von $8,6 \cdot 10^{-18}$ demonstrieren (Chou et al., 2010). Dies entspricht in der Nähe des Erdbodens einer Frequenzverschiebung, die einer Höhenänderung von 4 cm entspricht. Werden solche Stabilitäten erreicht, so können geometrische und gravimetrische Messungen nur noch als Re-

sultate eines gemeinsamen Messprozesses aufgefasst werden. Zudem wird sich die Frage nach der Realisierung der Internationalen Atomzeit auf dem zeitvariablen Geoid stellen. Grundlage ist neben der Entwicklung (transportabler) höchststabiler Frequenzstandards der hochpräzise Zeit- und Frequenzvergleich über große Distanzen.

Die FGS sieht ihre Aufgabe nicht in der Entwicklung optischer Uhren, kann sich aber mit ihrer fundierten Expertise im Bereich des Zeit- und Frequenztransfer mittels geodätischer Techniken einbringen. Am Geodätischen Observatorium stehen Cäsium-Frequenznormale und Wasserstoffmaser im Einsatz, um für die Station eine präzise Zeitbasis sowie eine Frequenz mit hoher Stabilität zur Verfügung zu stellen. Über einen routinemäßigen Zeitvergleich über GPS mit den Uhren an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) tragen die Atomuhren des Observatoriums zur Internationalen Atomzeit TAI bei. In der Berichtsperiode 2011-2015 sollen sämtliche Messsysteme an das Stations-Zeitsystem und damit an eine einheitliche Zeitskala angeschlossen werden. Dies eröffnet auf der Analyseseite die Möglichkeit, messsystemübergreifend gemeinsame Uhrenparameter zu schätzen. Neben dem Radioteleskop und dem GNSS-Referenzempfänger ist diese Einbindung auch für die Lasersysteme bereits erfolgt. Das Wettzell Laser Ranging System (WLRS) nimmt an Einweg-Zeitübertragungsexperimenten mit Laser im Rahmen des T2L2 Experiments auf dem Satelliten Jason-2 sowie an Einweg-Transpondermessungen zur NASA-Mondmission LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) teil. Im Rahmen des ACES Experiments ist das Observatorium maßgeblich am Laser-basierten Zeitübertragungsexperiment ELT beteiligt.

Die Tatsache, dass zukünftige Navigationssatelliten mit hochstabilen Frequenzgeneratoren ausgerüstet werden, eröffnet neue Möglichkeiten in der Analyse von GNSS-Daten. Anhand der innerhalb der FGS verfügbaren Beobachtungen der europäischen GIOVE-Satelliten konnte die hervorragende Qualität des Wasserstoffmasers auf GIOVE-B analysiert und bestätigt werden (s. Abschnitt 4.1). Strategien zur optimalen Nutzung dieser Uhren sollen ausgearbeitet und getestet werden. Die Möglichkeit zur Modellierung der Uhren wird die heute noch übliche doppelte Differenzierung von GNSS Beobachtungen in der Datenanalyse hinfällig machen. Kombination der Messverfahren auf Beobachtungsstufe – d.h., insbesondere unter Ausnutzung der gemeinsamen Zeitskalen der VLBI und GNSS Systeme – wird einen Arbeitsschwerpunkt der FGS bilden. Neben der Kombination auf Beobachtungsstufe von VLBI und GNSS müsste auch eine Anbindung der hochstabilen Frequenzgeneratoren der DORIS-Sendestationen an ko-lokierte GNSS-Empfänger und gemeinsame Analyse der beiden Datentypen zu einem signifikanten Gewinn für die Resultate des französischen Messsystems führen.

Neben den "klassischen" Zeit- und Frequenzsystemen befindet sich am Geodätischen Observatorium auch ein höchststabiler optischer Resonator – der G Ringlaser. Die Güte dieses Resonators ist rund sieben Größenordnungen besser, als heutige mit optischen Uhren eingesetzte Quarzresonatoren. Die PTB hat ihr Interesse am Einsatz des Ringlasers als "optisches Schwungrad" bekundet. Über einen Frequenzkamm besteht zudem die Absicht, die stabile optische Frequenz des Ringlasers in den Mikrowellen-Frequenzbereich zu transformieren und als "optischen Maser" für die Messsysteme, insbesondere VLBI nutzbar zu machen. Mit den technischen Entwicklungen sind theoretische Untersuchungen und Simulationen erforderlich, welche die Verbesserungen für VLBI quantifizieren, die mit der um mehrere Größenordnungen stabileren Frequenz erwartet werden.

1.5 Neue Generation Schwerefeldsatellitenmissionen

Der Erfolg der neuartigen Satellitenmissionen CHAMP, GRACE und GOCE haben dem Forschungsfeld der Satellitengravimetrie einen erheblichen Auftrieb verliehen. Erstmals ist es möglich, auch zeitliche Veränderungen in Erdschwerefeld – verursacht durch Massenverlagerungen in Atmosphäre, Ozeanen, Eisschilden und in der festen Erde – zu erfassen. Von grundlegender Bedeutung ist eine konsistente Verknüpfung dieser Schwerefeldzeitreihen mit den Variationen der Erdfigur und der Erdrotationszeitreihen. Ziel ist dabei insbesondere die Trennung von Bewegungen von Massenanteilen. Eine konsistente Verknüpfung von Figur, Erdrotation und Schwere ist außerdem Grundvoraussetzung für die Schaffung eines globalen erdfesten Referenzsystems mit einer Genauigkeit, wie sie durch die Ziele von GGOS gefordert wird.

Die FGS ist bereits seit dem Start des Satelliten CHAMP im Jahre 2000 mit der Analyse von Satellitendaten zur Schwerefeldbestimmung beteiligt. Als Koordinator des Projektes EGG-C (European GOCE Gravity Consortium) ist das IAPG gegenüber der ESA verantwortlich für die Berechnung des offiziellen Schwerefeldes aus den Messdaten des Satelliten GOCE und hat einen vertieften Einblick in die Mission. Die FGS ist in eine Reihe von Satellitengravimetrie-bezogenen Projekten eingebunden wie dem Geotechnologien-Schwerpunktprogramm "Erfassung des Systems Erde aus dem Weltraum" im Bereich der Sensoranalyse und GOCE-Datenanalyse und dem DFG Schwerpunktprogramm "Massentransporte und Massenverteilung im System Erde". Im Rahmen der Exzellenzinitiative der TUM konnte das IAPG zusammen mit dem Astronomischen Institut der Universität Bern die Schwerefeldanalyse aus Satellitenmessungen als Projekt "Satellitengeodäsie" ins Programm des Institute for Advanced Study (IAS) der TUM einbringen.

Die FGS nutzt ihre hervorragende Ausgangsposition um bedeutende Beiträge längs der gesamten Analyseketten der Schwerefeldbestimmung aus Satellitendaten zu liefern. Laufende Arbeiten beschäftigen sich mit der Detailanalyse der Sensorsysteme, der eigentlichen Verarbeitung der großen Datenmengen, der Technik des De-Aliasing mit erdwissenschaftlichen Hintergrundmodellen und der Validierung der resultierenden Schwerefelder, aber auch der Kombination von Schwerefelddaten verschiedener Satelliten und terrestrischer Messungen sowie der regionalen Darstellung von Schwerefeldern. In Zukunft sollen sich die Arbeiten verstärkt auch mit der wissenschaftlichen Nutzung der Satellitengravimetrie in Geodäsie und Erdwissenschaften befassen.

Die Interpretation von Massenverlagerungen im Erdsystem erfordert eine lückenlose Zeitreihe und damit eine durchlaufende Erfassung von Schweredaten aus dem Weltraum. Es ist selbstverständlich, dass sich die FGS daher mit Überlegungen, Analysen, Vorschlägen und Entwicklung von Zukunftskonzepten an Initiativen beteiligt, eine Folgemission im Bereich der Satellitengravimetrie zu verwirklichen.

1.6 Geodäsie und Erdsystemforschung

Die Geodäsie stellt die metrische Datenbasis für die Erdsystemforschung auf großen und kleinen Raum- und Zeitskalen bereit. Sie analysiert die Beobachtungen im Hinblick auf zeitvariable globale und regionale dynamische Prozesse innerhalb und zwischen einzelnen Komponenten des Erdsystems und liefert mittels der Beobachtungen Input für (geo-) physikalische Modelle, welche auf der Basis mathematischer oder empirischer Funktionensystemen entwickelt werden. In den geodätischen Parametern bilden sich geophysikalische Prozesse ab. Durch eine lange Beobachtungshistorie ermöglicht die Geodäsie die Feststellung von Langzeitveränderungen. Dadurch leisten die Beobachtungen einen fundamentalen Beitrag zum Verständnis von regionalen und globalen langfristigen Vor-

gängen und Änderungen, auch und gerade im Hinblick auf den globalen Wandel.

Die an der FGS beteiligten Institutionen sind seit vielen Jahren im Bereich der Erdsystemforschung tätig. Die Grundlage der Arbeiten bilden dabei geodätische Parameterzeitreihen, welche innerhalb der FGS aus geometrischen und gravimetrischen Beobachtungen berechnet werden. Um die Parameterzeitreihen physikalisch zu interpretieren, werden die Beiträge spezifischer dynamischer Prozesse zu den beobachteten Signalen erforscht, und die beobachteten Variationen auf diese Weise in einzelne ursächliche Vorgänge im Erdsystem getrennt. Hierzu werden theoretische und numerische Modelle entwickelt, die dynamische Prozesse im Erdsystem mit den geodätischen Parametern verknüpfen. In die Modellierung werden auch die im Rahmen zahlreicher interdisziplinär durchgeführter Projekte verfügbaren Beobachtungs- und Modelldaten anderer Wissenschaftszweige, vor allem der Geophysik, Meteorologie, Ozeanographie und Hydrologie, mit einbezogen. Hierzu werden Kontakte zum GFZ, DLR, LMU, AWI intensiv genutzt.

Aufgrund des großräumigen oder globalen Charakters des überwiegenden Teils der innerhalb der FGS berechneten und analysierten geodätischen Parameterzeitreihen, fokussieren sich die laufenden Projekte auf Prozesse im Erdsystem, welche auf großen räumlichen Skalen ablaufen:

- Im Bereich der festen Erde erstrecken sich die Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig auf die Lithosphärendynamik, die Elastizitätseigenschaften der Erdkruste und die Oberflächendeformation der Erde durch Auflasten, die Rotationsdeformation und die Erdzeiten.
- Im Bereich der Atmosphäre liegen die Schwerpunkte auf der Modellierung der Troposphäre, der Ionosphäre und atmosphärischer Massenvariationen.
- Im Bereich der Ozeanosphäre werden insbesondere die Kinematik und Veränderung des Meeresspiegels, die Veränderung von Ozeanströmungen, ozeanische Massenvariationen und Ozeangezeiten modelliert.
- Untersuchungen zur kontinentalen Hydrosphäre erstreckten sich auf die Modellierung regionaler Frischwasserflüsse und Wassermassenbilanzen.

Darüber hinaus werden komplexe dynamische Erdsystemmodelle entwickelt, die eine Vielzahl von Prozessen im Erdsystem konsistent beschreiben (Seitz, 2004). Mit derartigen Modellen vorwärts berechnete Drehimpuls-, Masse- und Energieaustauschprozesse zwischen den Systemkomponenten werden mit entsprechenden aus integralen geodätischen Beobachtungszeitreihen der Erdrotationsparameter, der Schwerefeldkoeffizienten und der Oberflächendeformation abgeleiteten Größen bilanziert. Daraus können neben der Qualität der Modelle auch die Beiträge nichtmodellierter Systemkomponenten zu den Bilanzen im Erdsystem abgeleitet werden. Die Arbeiten sind eingebunden in jene der DFG Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse".

2 Messsysteme der FGS

Im Zeitraum von 2011 bis 2015 ist die auf den geodätischen Observatorien vorhandene und weiterentwickelte Beobachtungstechnik zu konsolidieren. Das betrifft insbesondere den Einsatz des SOS-W und der Twin-Radioteleskope auf dem Geodätischen Observatorium Wettzell. Der Einsatz der Großgeräte auf dem Geodätischen Observatorium Wettzell (Twin-Radioteleskope, 20 m Radioteleskop, SOS-W, WLRS, G Ringlaser) ist unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen zu optimieren.

Zur nachhaltigen Sicherung des Beobachtungsbetriebes für die internationalen geodätischen Dienste und die Auslastung der Technik ist die Automatisierung der Beobachtungsprozesse zu entwickeln und zum Einsatz zu bringen (Abschnitt 2.9). Für den Einsatz des Twin-Radioteleskops auf dem Geodätischen Observatorium Wettzell sind verschiedene Messanordnungen zu entwickeln und zu erproben. Zur Erhöhung der Wirksamkeit des Twin-Radioteleskops Wettzell soll im Rahmen der IAG/GGOS auf die Weiterentwicklung dieser Technik auf anderen global verteilten Beobachtungsstationen hingewirkt werden. Die FGS wird Partner im internationalen Bereich bei der Entwicklung dieser Systeme beraten (Abschnitt 2.1).

Die erkannten Probleme bei der Kombination der verschiedenen Raumverfahren auf Kollokationsstationen zur Realisierung des Terrestrischen Referenzsystems mit 10^{-9} sind mit alternativen Konzepten (Zeithaltung) zu untersuchen und nach Lösungen für local tie-Bestimmungen zu suchen. Es besteht das Ziel, die in eigenen Zeitskalen betriebenen Messsysteme in einer einheitlichen Zeitskala zusammenzuführen (Abschnitt 2.2). Alle GNSS-Stationen sind mit einheitlichen RT-Komponenten und bei Verfügbarkeit von Galileo mit 3-G-kombinierten Empfängern auszurüsten (Abschnitt 2.5).

Auf geodätischen Observatorien wächst mit der gestiegenen Messgenauigkeit die Abhängigkeit von lokalen Einflüssen. Die Komplexität der hydrologischen, meteorologischen, geologischen und atmosphärischen Komponenten ist im Hinblick auf die Verbesserung der Konsistenz zu betrachten (Abschnitt 2.8). Absolutgravimeter (AG) realisieren in den zukünftigen Schwerereferenzen physikalische Standards für Zeit und Länge. Die Sicherstellung dieser metrologischen Standards und Einbindung in das SI-System erfolgt durch 4-jährige Vergleiche bei BIPM (Frankreich) sowie auf regionalen Vergleichsstationen. Die Station Wettzell soll zur regionalen Vergleichsstation ausgebaut werden (Abschnitt 2.6). Die Nutzung der Lasermesssysteme des BKG für interplanetare Missionen und Zeitübertragungsexperimente ist zu entwickeln (Abschnitt 2.4).

Das Geodätische Observatorium Wettzell soll als Referenz-Fundamentalstation für andere Stationen im Rahmen von GGOS weiterentwickelt werden.

2.1 Die geodätischen Observatorien der FGS

Die FGS dient in Fortführung des SFB 78 seit ihrer Gründung im Jahre 1983 insbesondere dem Betrieb und dem weiteren Ausbau der Fundamentalstation Wettzell. Das Geodätische Observatorium Wettzell wird seitdem vom BKG und der TU München gemeinsam betrieben. Grundlage dafür ist die Vereinbarung und Ordnung der FGS vom 1. Juli 1983, die die Zusammenarbeit der in der FGS beteiligten Institutionen beim Betrieb und der Weiterentwicklung des Geodätischen Observatoriums regelt.

Das GO Wettzell hat sich zu dem weltweit führenden geodätischen Beobachtungsstandort einwickelt, auf dem praktisch alle relevanten Beobachtungssysteme kombiniert werden. Die Forschungsprogramme der

FGS haben auch dazu geführt, dass in Abstimmung mit den internationalen geodätischen Diensten ständig die Messsysteme bedarfsgerecht weiterentwickelt wurden und die Beobachtungsdaten einer problem- und zeitgerechten Nutzung zugeführt werden. Es ist erklärtes Ziel, die Kooperation zwischen dem BKG und der TU München beim Betrieb des GO Wettzell und mit den anderen Partnern in der FGS zum weiteren Ausbau der Station fortzusetzen.

Nach den Aufbaujahren des GO Wettzell (1983 Radioteleskop, 1988 WLRS) wurde seit Anfang der neunziger Jahre das Konzept des transportablen geodätischen Observatoriums entwickelt und umgesetzt, das der Verbesserung der globalen geodätischen Infrastruktur dienen soll. Das im Rahmen der FGS entwickelte „Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO)“ wird seit 2002 mit großem Erfolg für den Aufbau der globalen geodätischen Infrastruktur und für die Unterstützung regionaler geowissenschaftlicher Aufgaben in Concepción/Chile eingesetzt. Es kommen die gleichen Beobachtungstechniken wie beim GO Wettzell zum Einsatz. Rechtliche Grundlage für den Einsatz ist bislang die „Vereinbarung über die Durchführung eines wissenschaftlichen Projekts unter der Bezeichnung TIGO“ zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Republik Chile vom 28.09.2001. Mit dem Vollzug der Vereinbarung beauftragte die deutsche Regierung das BKG und die chilenische Regierung die Universidad de Concepción (UdeC). Nachdem diese vor kurzem erklärt hat, dass sie sich aus dieser Verpflichtung zurückziehen will, kann über die Zukunft von TIGO zum Zeitpunkt der Begutachtung keine Aussage gemacht werden. Derzeit bemüht sich das BMI über die deutsche Botschaft in Chile darum, den Betrieb in Concepción dadurch zu stabilisieren, dass ein von der chilenischen Regierung beauftragtes Konsortium TIGO übernimmt und weiterhin zu den IAG-Diensten beiträgt.

TIGO ist das einzige geodätische Observatorium in Lateinamerika, das die Merkmale einer Fundamentalstation erfüllt. Es hat sich aufgrund der in den letzten Jahren durchgeführten Modernisierung und der mittlerweile sehr guten Ausbildung des chilenischen Personals zu einem der weltweit leistungsfähigsten Observatorien entwickelt.

Die Weiterführung des Betriebs des geodätischen Observatoriums TIGO an seiner exponierten Lage in Concepción wird auch deshalb angestrebt, da ein Wegfall zu einer deutlichen Verschlechterung der Genauigkeiten der globalen Referenzsysteme führen würde. Chile sollte dabei zunehmend für den Beobachtungsbetrieb und die Bereitstellung der dafür erforderlichen Ressourcen verantwortlich werden. Das entspräche Chiles den letzten Jahren gewachsenen Stellung in der internationalen Gemeinschaft, die in diesem Zusammenhang besonders durch seine Mitgliedschaft in der OECD und GEO zum Ausdruck kommt. Die FGS beabsichtigt, die chilenischen Partner bei der Aus- und Weiterbildung des Personals, bei der Koordinierung des Beobachtungsbetriebs und bei der Weiterentwicklung der dafür erforderlichen Technologien nachhaltig unterstützen.

Durch das fünfstärkste jemals registrierte Erdbeben der Stärke 8.8 (Richterskala) in Concepción hat sich die Situation in Chile und auch für TIGO verändert. Die chilenische Regierung wird in den nächsten Jahren mit Wiederaufbauprogrammen von dem betroffenen Gebiet (7. und 8. Region Chiles) beschäftigt sein. Obgleich TIGO auch Schäden zu beklagen hatte, konnte der Messbetrieb in kurzer Zeit für VLBI, SLR und Gravimetrie nach dem Beben wiederhergestellt werden. Die GPS/GLONASS-Permanentstation CONZ zeichnete dank eigener Solarstromversorgung vor, während und nach dem Erdbeben eine weltweit einmalige Datenreihe im 1-Sekundentakt auf. Diese Datenreihe enthält die genaue Bewegung während des 147 Sekunden langen Erdbebens und die postseismischen Bewegungen in den Wochen nach dem Erdbeben. Die mit

GPS/GLONASS gemessene Translation von über 3 Metern während der ersten 30 Sekunden des Erdbebens hat TIGO auch in Chile Anerkennung gebracht. Die Verschiebung konnte unabhängig von GPS/GLONASS auch durch VLBI und SLR-Messungen bestätigt werden.

In Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreibt das BKG die German Antarctic Receiving Station (GARS) O'Higgins. Dabei werden vom BKG kontinuierliche GNSS und Pegelbeobachtungen und während des antarktischen Sommers VLBI-Beobachtungen in Kampagnen ausgeführt. Die DLR nutzt das Radioteleskop für den Empfang von Daten von Fernerkundungssatelliten. Voraussetzung für die Weiterführung der Arbeiten in O'Higgins ist die gegebene Fortführung der Aktivitäten durch die DLR. Die bestehenden geodätischen Messsysteme sind deshalb zu erhalten.

2.2 Zeit und Frequenz

Die Zeit spielt in den heutigen (geometrischen) geodätischen Messsystemen eine fundamentale Rolle, die mit dem Aufkommen ultrastabiler Uhren in Zukunft noch weiter verstärkt werden wird. Jede Streckenmessung wird letztlich auf eine Zeitmessung zurückgeführt. Auch als vierte Koordinatenachse der Raumzeit – als Argument zur Beschriftung aller Messergebnisse – spielt die Zeit eine herausragende Rolle für ein Fundamentalobservatorium. Als bestens vermessene Orte mit wohlbekannter Lage im Schwerepotential ist es selbstverständlich, dass die mit je einem Cäsiumnormal und zwei Wasserstoffmasern realisierten Zeithaltungssysteme der Observatorien Wettzell und TIGO zur Weltzeit UTC beitragen. Zur Zeitübertragung stehen hierzu heute GPS-Zeitempfänger zur Verfügung. Dieser Beitrag zur internationalen Zeithaltung soll weitergeführt werden.

Die Radioteleskope (das bisherige 20m-Teleskop und die zukünftigen Twin-Teleskope), die beiden Satelliten-Laser-Ranging (SLR) Systeme WLRS und SOS-W, der Ringlaser sowie die anderen Messverfahren verwenden hochstabile Zeit- und Frequenznormale wie Cäsium-Uhren und Wasserstoff-Maser. Im Gegensatz zu den modernen kurzzeitstabilen H-Masern ist die Technologie der hier verwendeten ausgezeichnet arbeitenden langzeitstabilen Cäsium-Zeitnormale ca. drei Jahrzehnte alt.

2.2.1 Zeithaltung

Gegenwärtig werden für alle Techniken der geodätischen Raumverfahren und der Zeithaltung auf dem GO Wettzell unterschiedliche Zeitskalen verwendet, deren relativer Versatz und Drift zueinander nicht weiter bekannt sind und bislang auch nicht in der Kombination der Verfahren berücksichtigt werden. Es ist wahrscheinlich, dass dieser Umstand einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die systematischen Fehler zwischen den Techniken ausübt. Durch geeignete Maßnahmen auf dem GO Wettzell und in der Datenanalyse sollen daher diese Zeitskalen zu einer repräsentativen Zeitskala vereinheitlicht und geeignete Verfahren zur Zeitsynchronisation mit anderen geodätischen Observatorien und Zeitlaboren entwickelt werden. Grundlage dafür ist eine Überarbeitung der Verteilung der Referenzfrequenz zu den einzelnen Instrumenten, der Einsatz temperaturstabiler Komponenten wie Kabel und Frequenzverteiler. Es wird damit eine Verknüpfung der Messsysteme – VLBI, SLR, GNSS – über eine gemeinsame Zeitskala (lokale Verknüpfung über Zeitparameter) erreicht. Eine hochwertige Anbindung der GNSS-Empfänger an die Referenzfrequenz dient zum präzisen Frequenzvergleich mit Zeitlabors und anderen Observatorien.

2.2.2 Einwegstreckenmessung (Transponder)

Laser-Transpondersysteme erlauben eine Streckenmessung über interplanetare Distanzen sowie eine Zeitübertragung zwischen Sender und

Empfänger mittels kurzer Laserpulse. Wie bei allen Einwegmesssystemen wird für solche Aktivitäten eine hochpräzise Epochenregistrierung des ausgesendeten Lichtpulses und eine sehr gute Langzeitstabilität der lokalen Zeitsystems benötigt. Das Geodätische Observatorium unterstützt bereits heute mit dem WLRS wissenschaftliche Laser-basierte Zeitübertragungs-Kampagnen auf internationaler Ebene wie T2L2 (Time Transfer by Laser Link, Frankreich), ELT (European Laser Time Transfer, ESA) und LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter, NASA). Wettzell ist bislang das einzige Observatorium, dessen Laser-Zeitsystem den Anforderungen nahe kommt. Zukünftig wird eine bessere Anbindung an führende Zeitlaboratorien und eine genauere Realisierung der Epoche an den verschiedenen Messsystemen gefordert sein.

Eine Anwendung dieser Technologien ist für die ACES Mission vorgesehen (2013 – 2015). Während der Schwerpunkt der Beobachtungen im Rahmen der LRO Mission bei der Bahnbestimmung (Gravitationsfeld) im Lunarorbit liegt, kommt es bei dem ACES Projekt auf eine exakte Zeitübertragung mit einer Genauigkeit von besser als 50 ps zwischen der Master-Clock des Geodätischen Observatoriums Wettzell und der Pharaohuhr im erdnahen Orbit an. Die optische Zeitübertragung zwischen einem Ensemble von Bodenstationen und ACES ist zum Baseline-Konzept von ACES hinzugefügt worden. Das ELT (European Laser Timetransfer) soll mit einem Photodetektor und einem Laser-Retroreflektor an Bord von ACES simultan Einweg- und Zweiwegstreckenmessungen erlauben. Gleichzeitig ist eine Mikrowellen-Zweiwegverbindung sowie ein GPS-Empfänger für den Zeit- und Frequenztransfer vorgesehen. Wettzell kommt aufgrund seines für geodätische Beobachtungen optimierten und hochwertigen Zeitsystems im Rahmen des ILRS eine besondere Bedeutung zu. Die erforderlichen Beobachtungen werden aufgrund der Wellenlängenspezifikation (532 nm) mit dem WLRS zu beobachten sein. Um die Zeitübertragung (Epoche) für die aktuelle T2L2 Mission und die künftige ELT-Mission mit der höchst möglichen Genauigkeit zu realisieren, ist der Epochenversatz zwischen WLRS und Zeitsystems des GO Wettzell (Masteruhr) hochgenau und als Funktion der Zeit zu bestimmen.

Da der Photodetektor im Einzelphotonenmodus arbeitet, jedoch ein großes Gesichtsfeld aufweist, müssen die Pulsaussendezeitpunkte für die am Experiment teilnehmenden Laserstationen im Mikrosekundenbereich festgelegt werden. Dies bedingt eine präzise Bahnvorhersage für die ISS und eine genau bekannte Ablage der ACES-Zeit zu UTC. Die registrierten Photoimpulse werden anschließend mit den Sendezeitpunkten korreliert und den ILRS Laserstationen zeitnah Rückmeldung geliefert, ob die Messungen erfolgreich waren. Es besteht die Absicht, innerhalb der FGS einen entsprechenden Service zur Unterstützung des ELT-Experiments aufzubauen (Trefferprognose und Datenanalyse). Aus den anfallenden Daten sollen Zeitvergleiche zwischen den Zeitsystemen der teilnehmenden Laserstationen und der ACES-Uhr sowie zwischen den verschiedenen Bodenstationen abgeleitet werden. Für SLR Stationen, deren Zeitsystem an UTC angekoppelt ist, kann damit Gang und Stabilität der ACES-Uhr untersucht und Zeitvergleiche zwischen Bodenstationen mit Resultaten anderer Verfahren verglichen werden. Die Zeitvergleiche mit der hochstabilen Uhr im Orbit erlauben zudem die Untersuchung relativistischer Effekte auf Uhren im Schwerfeld.

Transponder werden in Zukunft Laserdistanzmessungen zum Mond für mit geeigneten Zeitsystemen ausgerüstete Laserstationen möglich machen. Mondlandegeräte, welche Laser-Transponder, aber auch z.B. einen VLBI-Sender mit der Mondoberfläche verknüpfen, würden bei der Verknüpfung von kinematischen und dynamischen Bezugssystemen eine wichtige Rolle spielen. Interplanetare Transponderexperimente sind bereits geplant (z.B. Jupitermissionsstudie EJSM, NASA und ESA). Mit ei-

nem Experiment am WLRS in Wettzell wurde gezeigt, dass mit kleinen Transpondereinheiten Entfernungen bis zu rund 0.4 Astronomische Einheiten problemlos überbrückt werden können (Holzapfel, 2008). In der FGS besteht die Absicht, sich an entsprechenden Laser-Experimenten und Studien zu beteiligen und die nötigen technischen Voraussetzungen bezüglich Stations-Zeitsystem zu schaffen.

2.2.3 Der G Ringlaser als optischer Resonator höchster Güte (Pilotprojekt)

Bei der VLBI führt eine höhere Stabilität der Uhren zu einer Steigerung des Auflösungsvermögens dieses Messverfahrens und ist daher von großem Interesse für die mittelfristige Fortentwicklung des Geodätischen Observatoriums Wettzell. Die erforderliche kurzzeitstabile Frequenz wird heute durch den Wasserstoffmaser bereitgestellt. Am Observatorium in Wettzell steht jedoch mit dem G Ringlaser ein optischer Resonator mit einer unerreichten Güte von 10^{12} zur Verfügung. Die Frequenz des Laserlichtes wird durch einen frequenzstabilen Laser kontrolliert und über den Luftdruck in der den Ringlaser umschließenden Druckkammer gesteuert. Naheliegender ist daher, die hochstabile Laserfrequenz mittels eines Frequenzkammes in den technisch nutzbaren Mikrowellenbereich zu transformieren.

Die optische Frequenz von ca. 474 THz des HeNe-Ringlaserresonators wird an einem Spiegel ausgekoppelt und mit einem Frequenzkamm über einen geregelten Diodenlaser verglichen. Eine Rückkopplung bindet den Frequenzkamm starr an das Ausgangssignal des Ringlasers und reduziert auf diese Weise den Jitter der Kammanordnung (Beverini et al., 2004). Aufgrund der Unterersetzung von dem optischen THz-Bereich in den Hochfrequenzbereich ergibt sich ein wesentlich verringertes Phasenrauschen (Lipphardt et al., 2008). Damit kann eine Alternative zu den Wasserstoffmasern bereitgehalten werden, welche deren Frequenzstabilität um Größenordnungen übertrifft. Ein solches Verfahren würde die Ringlaserfunktionen nicht beeinträchtigen.

An der PTB werden heute als "Schwungräder" für optische Uhren Quarzresonatoren mit einer Güte von 50000 eingesetzt. Eine Zusammenarbeit mit der PTB ist vorgesehen (Arbeitsgruppe 4.43 "Optische Uhren mit einzelnen Ionen"). Erforderlich ist eine detaillierte Analyse der Vorteile einer gesteigerten Frequenzstabilität für VLBI.

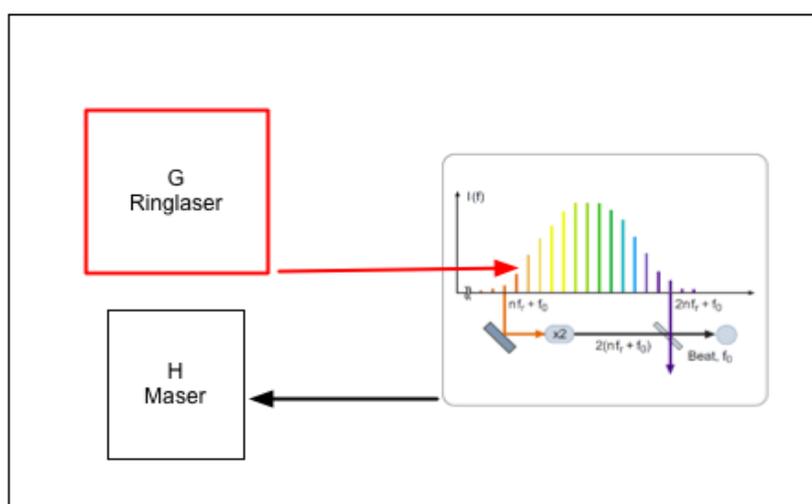


Abbildung 2.1: Schema zur Verbesserung der Kurzzeitstabilität einer Mikrowellenquelle über einen Laserresonator in Verbindung mit einem optischen Frequenzkamm.

2.2.4 Optische Uhren

Die Entwicklung optischer Uhren hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Anstelle Quantensprünge der Elektronen im Mikrowellenbereich zu detektieren – wie bisher bei den Cäsium-Uhren – wird es nunmehr immer leichter von einzelnen Atomen einzelne scharfe Quantensprünge im optischen Frequenzbereich für die Zeitgenerierung heranzuziehen (siehe Abbildung 2.2, Sterr et al. 2004, Gill, 2005). Allgemeines Kennzeichen von optischen Uhren ist die gegenüber einem Wasserstoffmaser deutlich bessere Kurzzeitstabilität von 1 – 2 Größenordnungen im Integrationsbereich von 1 – 1000 Sekunden.

Es gibt Ansätze im Rahmen der Exzellenzinitiative QUEST der Leibniz-Universität Hannover und der PTB, optische Uhren innerhalb der nächsten 5 Jahre so weiter zu entwickeln, dass sie für den tragbaren Feldeinsatz geeignet sind. Daher sollte sich die FGS im auf eine mögliche Nutzbarkeit solcher Apparaturen vorbereiten. Es soll untersucht werden, welches Potential optische Uhren für die geodätischen Raumverfahren bieten und in welcher Konfiguration sie am besten einzusetzen sind. Insbesondere sollen in die Untersuchungen auch die sich für die Zukunft abzeichnenden Möglichkeiten einfließen, Potentialdifferenzen direkt mit Uhren zu messen. Eine geodätische Fragestellung betrifft beispielsweise eine zukünftige Definition der internationalen Atomzeit in einer durch Massenverschiebungen gekennzeichneten Raumzeit.

2.2.5 Zielstellungen Zeit und Frequenz

Zeit und Frequenz entwickeln sich zu einem zentralen Thema am Geodätischen Observatorium Wettzell. Ein Zusammenführen aller Messsysteme an eine einheitliche stabile Stationszeitskala unter Verwendung hochwertiger und kalibrierter Komponenten wie Frequenzverteiler und Kabel soll die Konsistenz der Messsysteme weiter erhöhen. Dadurch soll auch die kombinierte Analyse der Messungen auf Beobachtungsstufe ermöglicht werden. Der Beitrag an TAI soll weitergeführt und damit die Stationszeitskala an die internationale Atomzeit angebunden werden.

Das Geodätische Observatorium wird sich mit dem WLRS an internationalen Experimenten zum Zeittransfer mittels Einweg-Lasermessungen beteiligen. Insbesondere erwähnt sei das geplante Laser-Zeittransferexperiment ELT mit der ACES-Uhr auf der internationalen Raumstation, an welchem sich die FGS maßgeblich beteiligt. Neue Möglichkeiten bietet der Einsatz des Großlaserkreises als optischen Resonator höchster Güte. Mit einem Frequenzkamm kann die hochstabile Laserfrequenz im Mikrowellenbereich nutzbar gemacht werden. Dabei ist eine Zusammenarbeit mit der PTB anzustreben. Der Nutzen einer um mehrere Größenordnungen stabileren Referenzfrequenz soll mit Simulationen untersucht werden. Schließlich soll das Potential optischer Uhren an geodätischen Observatorien erforscht werden.

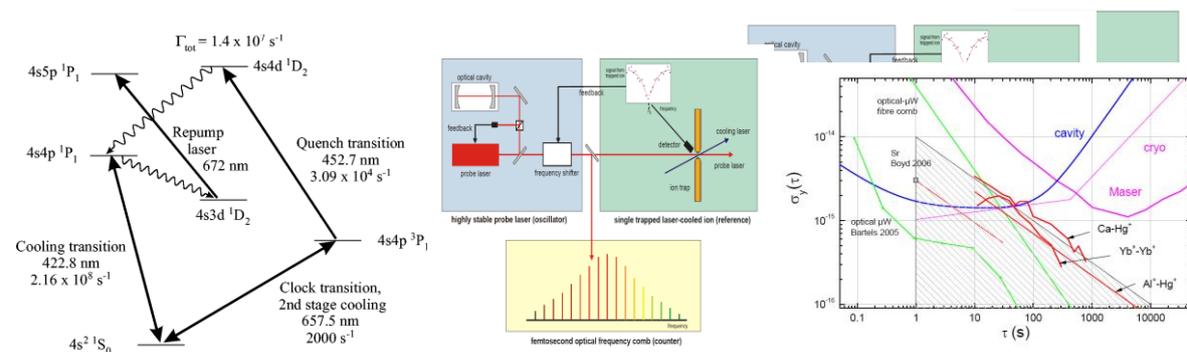


Abbildung 2.2: Optische Uhr: links: Energie-Diagramm aus „Calcium Optical Frequency Standard Research“ (PTB), mitte: Arbeitsprinzip (NPL), rechts: Stabilität verschiedener Materialien (PTB).

2.3 VLBI

2.3.1 Stand der Arbeiten

Das Radioteleskop Wettzell ist in das Beobachtungsprogramm des IVS eingebunden und hierin seit Jahren das meist ausgelastete Teleskop für geodätische Messungen. So nahm es 2009 an 130 24-Stundenmessungen und an 387 INTENSIVE-Beobachtungen teil. Neben den wöchentlichen Rapid-Turnaround-Sessions R1 und R4 werden auch regelmäßig Beobachtungen zur Bestimmung des terrestrischen Referenzrahmens (T2), Research & Development (R&D), astrometrische Messungen (RDV) und spezielle, europäische Messungen für den IVS durchgeführt. Ebenfalls wurden 2008 die 14-tägigen, kontinuierlichen CONT-Messungen fortgeführt. Die langjährige INTENSIVE-Beobachtungsreihe mit täglichen Beobachtungen für die Dauer von einer Stunde zur Ableitung der Rotationsphase der Erde (UT1-UTC) wurde fortgesetzt. Von Montag bis Freitag laufen gemeinsame Beobachtungen von Wettzell mit Kokee Park auf Hawaii. Samstag und Sonntag werden diese mit Wettzell und Tsukuba in Japan fortgesetzt. Und jeden Montag findet eine zusätzliche Session der drei Radioteleskope Tsukuba, Ny Alesund und Wettzell statt.

Das GO Wettzell arbeitet kontinuierlich daran, das Radioteleskop und seine Komponenten auf dem neuesten Stand zu halten. Das Forschungsprogramm der Jahre 2005-2010 wies hierzu verschiedene Aufgaben auf, die alle erreicht werden konnten, bzw. durch weitere Tätigkeiten ausgebaut wurden (z.B. Fernsteuerung und zusätzliche Beobachtungen). Weiterhin wurde ein Motorenteststand zum Ausmessen von Eigenschaften der Antriebsmotoren eingerichtet und neue Hardware für die Datenproduktion integriert. Neben den mittlerweile üblichen Mark5a-Datenaufzeichnungssystemen stehen nun auch Mark5b mit den neuen VSI-Schnittstellen zur Verfügung. Hier musste der Formatter für das neue Ausgabeformat entsprechend umgebaut werden. Im Allgemeinen stehen viele Neuerungen im Zusammenhang mit den Ideen für e-VLBI und e-Transfer, bei denen die Daten nahe Echtzeit via Internet an die Korrelatoren versandt werden. Für diese Technik wurde 2007 eine Erhöhung der Übertragungsleistung der Internetverbindung für Wettzell auf 622 Mbit/sec eingerichtet. Diese wird zurzeit hauptsächlich zur routinemäßigen Übertragung der INTENSIVE-Daten nach den Experimenten zu den Korrelatoren mit bis zu 500 Mbit/sec genutzt. Dazu werden die Experimente erst auf herkömmliche Weise lokal aufgezeichnet und anschließend versandt. Für die Aufzeichnung werden mittlerweile herkömmliche UNIX-Festplattensysteme verwendet, wozu die EVN-PC-Entwicklung aus Metsahövi integriert wurde. Hinzu kam eine Eigenentwicklung eines umfangreichen Raid-Systems mit effektiv bis zu 60 TByte Kapazität, auf dem auch herkömmliche 24-Stundenmessungen mit bis zu 350 Mbit/sec aufgezeichnet werden können.

Neben den routinemäßig eingesetzten Komponenten dient das Radioteleskop Wettzell auch als Testumgebung für neue Techniken. So wird seit 2007 in Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn die Neuentwicklung eines Digital Baseband Converters (DBBC) des INAF Italien bzw. der nun neu gegründeten Firma HATLab erprobt und unter realen Bedingungen getestet. Die Aufzeichnungen werden im Korrelator Bonn korreliert und ausgewertet. Zudem wurde das SELENE-Projekt des National Astronomical Observatory Japan (NAOJ) unterstützt, bei dem mit einem speziellen Aufzeichnungssystem aus Japan mittels VLBI die Bahnen der Mondorbiter VStar und RStar zur Bestimmung des Mondgravitationsfeldes gemessen wurden (Space Location). In Wettzell werden auch die Herausforderungen angenommen, Erfahrungen mit der Kryo-Empfangstechnik (Dewar) mit dem Ziel zu sammeln, die bestehenden und zukünftigen Systeme zu verbessern.

Die zu erwartenden Entwicklungen im Zusammenhang mit der VLBI2010-Initiative des IVS sind in vielen Bereichen von einer außergewöhnlichen Komplexität geprägt. Dies liegt in der Hauptsache daran, dass für viele der geplanten Komponenten noch keine anwendungsreifen Konzepte vorliegen. Zur Zeit sind nur einige wenige Institutionen im Umfeld der geodätischen VLBI aktiv mit Neuentwicklungen befasst, womit der FGS eine Vorreiterrolle zukommt. Dabei stellt die Entwicklung des Feedhorns eine zentrale Herausforderung dar, weil für die phasenstabile Einkopplung über eine Gesamtbandbreite von 2 bis 13 GHz bisher noch kein Bedarf bestand und deswegen auch keine Erfahrungen existieren. Momentan besteht hier, wie auch bei vielen anderen Komponenten, keine Absprache über eine konzertierte Aktion der Institutionen im IVS. Vielmehr werden Entwicklungen nur dann mit entsprechendem Einsatz angegangen, wenn für die Institution auch ein vordergründiger Bedarf existiert. Das führt dazu, dass noch nicht abzusehen ist, welche notwendigen Komponenten zu welchem Zeitpunkt zur Verfügung stehen werden. Dies gilt sowohl für die Hardware der Beobachtungsstationen als auch für Korrelatorkomponenten und Auswertesoftware.

Zu den Aktivitäten in Wettzell im Rahmen von VLBI2010 gehören mehrere, teilweise permanente Vermessungen des Referenzpunktes am 20m-Teleskop, die in Kooperation mit der Universität Karlsruhe durchgeführt wurden, um die Einflüsse von möglichen Veränderungen der geometrischen Struktur auf die Beobachtung besser abschätzen zu können. Zudem wurden die entsprechenden Grundlagen für neue Beobachtungsstrategien geschaffen, die in Zukunft den Messbetrieb auch von weit entfernten Teleskopen per Fernüberwachung ermöglichen sollen. Dazu wurde in einer Machbarkeitsstudie eine Software zur Fernsteuerung der Radioteleskope Wettzell, TIGO Concepción/Chile und GARS O'Higgins/Antarktis entwickelt und während herkömmlicher Sessions erfolgreich getestet. Hinzu kommen regelmäßige „unbeaufsichtigte“ („unattended“), automatisiert ablaufende Beobachtungen am Wochenende, die die gut gewartete Anlage ausnutzen, um eine möglichst hohe Anzahl an Beobachtungen zu gewährleisten.

Einige dieser Arbeiten fanden auch im Hinblick auf das TTW-Projekt statt. In der technischen Spezifikation anhand des IVS Strategiepapiers VLBI2010 wird damit die erste rigorose Umsetzung mit breitbandig ausgelegten, schnellen und baugleichen Radioteleskopen vorgenommen, welche der Ausschreibung im Jahre 2007 zu Grunde gelegt wurde. Der Auftragnehmer griff für den Drehstand der Twin-Radioteleskope auf sein ALMA-Design zurück, welches bereits mehrfach getestet wurde. Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen ist ein vorteilhafter Nebeneffekt. Die Optik des Radioteleskops sieht einen 13,2m großen Hauptreflektor mit einem Ringfokusdesign vor. Der primäre fokale Ring wird mit einer axial verschobenen und rotierten Ellipse in ihrem zweiten Brennpunkt, dem Sekundärfokus, vereinigt. Der Subreflektor lässt sich aktiv über einen Hexapod positionieren, um so die hohe Anforderung des 0.3mm Laufwegfehlers (Path length error) erreichen zu können. Die hohen Fahrgeschwindigkeiten in Azimut mit 12 Grad/Sekunde und in Elevation mit 6 Grad/Sekunde bei 3 Grad/Sekunde² Beschleunigung erfüllen die VLBI2010-Vorgaben, um mit einem 30 Sekunden langen Zyklus für Beobachtung und Quellenwechsel, die Beobachtungsdichte pro Zeiteinheit zu verzehnfachen. Damit soll die geforderte 1 Millimeter-3D Genauigkeit im globalen Referenznetz erreichbar werden. Interessante Anwendungen wie differentielles VLBI und Space Location von Raumobjekten, wofür entsprechende Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge bei der Positionierung und beim Quellenwechsel nötig sind, werden durch die dafür ausgelegte Spezifikation ermöglicht. In die Radioteleskope sollen neue, breitbandige Empfangstechniken integriert werden, die zurzeit in Form verschiedener gekühlter Feeds (z.B. Kildal Eleven Feed, Corrugated Tri-Band-Horn für dedizierte

Frequenzbereiche S-, X- und Ka-Band) von verschiedenen Gruppen entwickelt werden. Die Radioteleskope sollen nach dem Projektplan ab 2011 zur Verfügung stehen.

Die derzeit im IVS diskutierten Raumfahrtmissionen im planetaren Raum werden genaue Positionsbestimmungen im Weltraum benötigen, wie sie von globalen VLBI-Netzwerken bereitgestellt werden. Für die Ortung von Sonden im Weltraum wird eine echtzeitnahe Infrastruktur von Radioteleskopen, Korrelator und Auswertung benötigt.

2.3.2 Das 20m Radioteleskop

Das Radioteleskop Wettzell (RTW) ist seit 1983 operationell und ist bereits seit einigen Jahren das am häufigsten in VLBI-Messreihen eingesetzte Radioteleskop. Es spielt eine herausragende Rolle in den geodätisch-astrometrischen Beobachtungen des International VLBI Service for Geodesy & Astrometry (IVS). Für das Radioteleskop Wettzell liegen heute die längsten VLBI-Messreihen vor. Dabei führt die routinemäßige Beteiligung an täglichen Messungen zur Bestimmung der Erdrotationsparameter und von Krustenbewegung neben astrometrischer Aufgaben zu einer extrem hohen Auslastung und Beanspruchung, weshalb es durch das neue Twin Teleskop Wettzell (TTW) ergänzt und entlastet werden soll. Das RTW soll sich aber maßgeblich weiter an den Messprogrammen beteiligen, um die Unterhaltung und das Monitoring von Referenzsystemen, aber auch die Navigation interplanetarer Missionen maßgeblich zu unterstützen. Zudem können weiter verstärkt astrometrische und strukturbasierte Untersuchungen der Quellen des ICRF im Rahmen des IVS durchgeführt werden.

Eine Steigerung der Sensitivität und Anpassung der Hardware mit VLBI2010-kompatiblen Systemen (u.a. Digital Baseband Converter (DBBC) und neue Empfangstechnik) sichert weiter die herausragende Arbeit des RTW sowie das Ziel, am Aufbau von Quellenkatalogen in den neuen Frequenzbereichen mitzuarbeiten. Die Phasenkalibrierung soll durch den Einbau eines zeitgemäßen Kabelkalibriersystems für die Frequenzverteilung weiterentwickelt werden. Zudem sollen Strukturveränderungen aufgrund von temperaturbedingten und azimut- bzw. elevationsstellungsabhängigen Einflüssen durch Monitoring-Untersuchungen weiter überwacht werden. Ein wichtiger Punkt zum weiteren Betrieb des Teleskops ist der Ausbau der Automatisierung regelmäßiger Abläufe und der Fernsteuerung des Teleskops, um den Betrieb von einem Operator-Raum aus zu ermöglichen.

2.3.3 Das Twin Radioteleskop

Das bisherige Radioteleskop Wettzell wird in Zukunft durch das neue Twin Teleskop Wettzell (TTW) Projekt ergänzt werden. Es besteht aus zwei baugleichen 13,2 Meter Radioteleskopen, die eine erste Umsetzung der Ideen des IVS Visionspapiers VLBI2010 darstellen. Diese neue Art der Teleskope kann wesentlich schneller von Quelle zu Quelle fahren und ein breitbandiges Frequenzspektrum beobachten. Die RTW Betriebsgruppe wird das TTW-Projekt in der Projektierung und Inbetriebnahme begleiten und soll anschließend den Betrieb durchführen. Mit den neu installierten Twin-Radioteleskopen steht zusammen mit dem bestehenden 20m Radioteleskop in Wettzell ein Array aus drei Teleskopen zur Verfügung. Nach der Installation ergeben sich daher neue Möglichkeiten in der Beobachtungsstrategie, was gegenwärtig Gegenstand eines DFG-Forschungsprojektes am IGG Bonn ist. Optimierte Beobachtungsszenarien ermöglichen einen permanenten Betrieb. Die "Nullbasislinie" zwischen den Twin Teleskopen und dem RTW soll zur relativen Kalibrierung genutzt werden. Zudem soll die Möglichkeit untersucht werden, die Instrumente zur Erhöhung der Empfindlichkeit mittels Delay-Lines zusammenzuschalten. Ein wichtiger Beitrag ist der Ausbau der Automatisierung und der Fernsteuerbarkeit ("e-control") hin zu einer Flexibilisierung des

Schulungs. Für die zukünftige Verbesserung der Analysen sind zudem weitere Zusatzparameter im Umfeld der Beobachtung zu gewinnen.

2.3.4 TIGO

Das TIGO-Radioteleskop ist aufgrund seiner exponierten Lage in Südamerika ein unverzichtbares Element im globalen VLBI-Netzwerk. Im Ranking der Beobachtungshäufigkeit steht es bisher nach Wettzell an zweiter Stelle mit über 110 Beobachtungstagen à 24h. Analysen mit vorhandenen Beobachtungsdaten, die mit und ohne TIGO gerechnet wurden, zeigen, dass sich die Fehler der Erdrotationsparameter ohne TIGO verdoppeln. Daraus folgt, dass der VLBI-Standort in Concepción beibehalten werden sollte. Nach dem Erdbeben vom 27.02.2010 wird auch mit VLBI die postseismische Bewegung über interkontinentale Basislinien in einen globalen Kontext gestellt und das Messverfahren für die Plattentektonik wiederentdeckt.

2.3.5 O'Higgins

O'Higgins ist besonders durch die exponierte Lage auf der Antarktischen Halbinsel und damit weit im Süden der Südhalbkugel besonders interessant für Beobachtungen im Rahmen von VLBI. Dies wird im Hinblick auf die Umsetzung des GGOS-Konzeptes besonders wichtig. Mittlerweile kann die German Antarctic Receiving Station (GARS) O'Higgins auf eine beachtliche Zeitreihe zurückblicken, die kampagnenweise jeweils mit zwei Kampagnen im antarktischen Sommer gewonnen werden. Diese Zeitreihe soll fortgeführt und mittels Fernsteuertechniken ausgedehnt werden. Tests mit neu entwickelten Softwarekomponenten zeigen, dass ein abgesicherter Fernbetrieb über die große Distanz möglich ist (Abschnitt 2.9). In Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ergeben sich zukünftig auch Möglichkeiten, der schnelleren Internetanbindung für e-VLBI. Die Datenspeichersysteme sollen entsprechend aufgerüstet werden. Da das DLR die Kommandierungs- und Datenladezeiträume von Erdbeobachtungssatelliten weiter intensivieren wird, sind neue Beobachtungsstrategien und flexiblere Schedules nötig, welche Unterbrüche im Messablauf durch Satellitenüberflüge optimal einbeziehen und damit Standzeiten minimieren. Zudem ist ein umfangreiches Stationsmonitoring der Stationsparameter für Sicherheit und Qualität zu erreichen. Regelmäßige Wartungsarbeiten sind die Grundlage für einen sicheren Betrieb an der exponierten Lage.

2.3.6 Variationen der mechanischen und elektrischen VLBI-Referenzpunkte (Pilotprojekt)

Die präzise Kenntnis der Lage der mechanischen und elektrischen Referenzpunkte der VLBI-Teleskope relativ zum geodätischen Marker ist zentral zur korrekten Interpretation der Verbindungsvektoren zwischen den Instrumenten. Ziel des Pilotprojektes ist die Untersuchung der Veränderungen von mechanischem und elektrischem Referenzpunkt bzw. der Phasen- und Laufzeitkalibrierung (Einkopplung des Zeitreferenzpulses), Laufzeitvariationen durch Kabelbiegungen, etc. Es sollen Deformationsmessungen der Antenne weitergeführt und der Nutzung von Lichtwellenleitern zur Frequenzeinkopplung untersucht werden.

2.3.7 Korrelator

Mit Beteiligung der FGS wird am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn der Mark IV-Korrelator für die Routinekorrelationen der Beobachtungen des International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) betrieben. Die Notwendigkeit zur Durchführung von Korrelationen ergibt sich u.a. durch den hohen Anteil an Beobachtungen, den die FGS mit den Radioteleskopen in Wettzell, Concepción und O'Higgins sowie mit dem Radioteleskop des MPIfR in Effelsberg zu den internationalen Aktivitäten beiträgt.

Der Betrieb und die Funktion des Korrelators sind zurzeit noch ganz auf den Mark IV-Korrelator, der als reiner Hardwarekorrelator ausgelegt ist, zugeschnitten. Dieser Korrelator und die nachgelagerte Fringe-fitting-Software haben seit der Inbetriebnahme im Jahr 2000 einen kontinuierlichen Reifungsprozess durchlaufen, so dass das System bis auf kleinere Änderungen für Spezialanwendungen als relativ stabil betrachtet werden kann. Bestehende Probleme mit den sog. Station-Units werden Schritt für Schritt mit der Anschaffung von Mark5B-Wiedergabeeinheiten beseitigt. Der personelle Aufwand für die Korrelation einer VLBI-Messung fließt in erster Linie in die Vorbereitung (Aufsetzen der Steuerdateien) und Nachbearbeitung (Qualitätskontrolle und direkte Interaktion mit den Netzwerkstationen, wissenschaftliche Analyse, Reprozessierung und Export). Die Routine-Korrelation selbst wird meist mit studentischen Hilfskräften insbesondere mit Nacht- und Wochenenddiensten durchgeführt. Für die Einarbeitung der Hilfskräfte muss wegen ihrer natürlichen Fluktuation ein entsprechend hoher Aufwand betrieben werden. Ein nicht unerheblicher Teil der personellen Ressourcen wird für die Rettung von Daten bei Fehlfunktionen und Fehlsteuerungen aufgewendet. Diese sind i.d.R. von den Beobachtungsstationen zu verantworten und treten in der Hauptsache wegen alternder Hardware auf. In letzter Zeit kommen auf der Personalseite verstärkt Maßnahmen für die Kontrolle der elektronischen Datenübertragung (e-Transfer) hinzu (siehe Abschnitt 3.1).

Dem Reifungsprozess im Betrieb des Korrelators steht eine fortschreitende Alterung der Hardware gegenüber, so dass bereits seit einiger Zeit Überlegungen für einen Ersatz angestellt werden. Dabei hat sich herausgestellt, dass Korrelatoren, die auf der Basis von Standard-PC und entsprechender Software arbeiten, eine weit höhere Flexibilität schaffen. Außerdem ermöglicht die fortschreitende Entwicklung von Computern für den Massenmarkt eine preiswerte Möglichkeit für die kontinuierliche Anpassung der Hardware an den jeweiligen Stand der Technik. Für diese als Software-Korrelatoren bezeichneten Computer-Cluster ist der eigentliche Korrelationskernel schon vorhanden. Er wird bereits für erste astronomische Experimente im Testmodus eingesetzt. Für geodätische Anwendungen müssen noch Routinen für die Phasecal-Extraktion und die Subnetting-Steuerung sowie für den Daten-Export im fourfit-Format entwickelt werden. Da innerhalb der FGS dafür keine Ressourcen zur Verfügung stehen, muss hierfür auf Ergebnisse aus der internationalen Arbeitsteilung im Rahmen des IVS zurück gegriffen werden, was wiederum zu einer beachtlichen zeitlichen Verzögerung und einer wenig planbaren Entwicklung führt.

Software-Korrelatoren sind von Natur aus leicht skalierbar und können durch einen entsprechenden Einsatz einer großen Zahl von Prozessorkernen an den Bedarf angepasst werden. Der Kooperationspartner MPIfR verfügt zurzeit über einen Korrelations-Cluster von 60 Knoten, der mit Unterstützung des BKG angeschafft wurde. Dieser Korrelator würde für die Durchführung der Korrelation eines einzelnen geodätischen Beobachtungstages von 24h Dauer mit dem derzeitigen Frequenzsetup innerhalb von 2-3 Kalendertagen ausreichen, sobald die o.g. Software-Module zur Verfügung stehen. Damit ist der Durchsatz an geodätischen Sessions bei einer 50:50-Nutzung des Korrelators (Geodäsie: Astronomie) auf höchstens zwei Sessions pro Woche begrenzt. Eine Erweiterung der Kapazität durch Ergänzung mit weiteren Prozessorkernen ist zwar prinzipiell sehr einfach, muss aber durch flankierende Maßnahmen ergänzt werden. Dazu gehören zum einen der notwendige Einbau von zusätzlicher Kühlleistung und zum anderen ein exponentiell wachsender Anteil an Systemadministration. Für die Zukunft ist deshalb hier ein entsprechender Haushaltsansatz für diese Mehrkosten zu berücksichtigen.

Eine Steigerung der Kapazität hin zu einer größeren Bandbreite, größeren Stationsnetzen und weiteren Beobachtungstagen bis hin zu 24/7, wie

es im VLBI2010-Programm (Petrachenko et al., 2009) vorgesehen ist, erhöht die vorzusehenden Investitionen und laufenden Kosten noch einmal erheblich. Dies gilt insbesondere für den Aufwand, der für die Vorbereitung und Nachbearbeitung anzusetzen ist. Der momentane Personalstand, der dafür vom Institut für Geodäsie und Geoinformation aus der Vereinbarung mit dem BKG bereitgestellt wird, operiert bereits jetzt an der Grenze der Kapazitäten. Weiterhin ist, um einen erfolgreichen Korrelationsprozess zu gewährleisten, eine simultane Nutzung beider Korrelatoren (Hardware- und Softwarekorrelator) für einige Monate bis zu einem Jahr sinnvoll.

Ein ähnliches Szenario stellt sich auch beim Transport der Magnetplattenmodule vom Korrelator zu den Beobachtungsstationen dar. Solange nicht alle Stationen ihre Beobachtungsdaten über Internet-Leitungen oder reservierte Fasern transportieren können, bleibt der Magnetplattentransport ein maßgeblicher Faktor beim Betrieb eines Korrelators. Zurzeit kompensiert der kontinuierlich gesteigerte Bedarf an Beobachtungsbandbreite von ehemals 64 Mbit/s auf jetzt 256 Mbit/s und in diesem Jahr noch geplante 512 Mbit/s die jeweils verfügbare Bandbreite auf den Netzwerkverbindungen (vgl. Abschnitt 3.1).

Vor dem Hintergrund der VLBI2010-Aktivitäten muss auch eine Weiterentwicklung der fringe-fitting-Software stattfinden. Diese Software dient dazu, die Korrelationskoeffizienten für die einzelnen Kanäle in geodätische Beobachtungsgrößen, d.h. in Gruppen- und Phasenlaufzeitdifferenzen sowie Laufzeitdifferenzänderungen, umzusetzen. Eine Bestimmung der Laufzeitdifferenzen über eine Gesamtausgleichung über alle Kanäle war bisher aus Gründen der begrenzten Computerleistung nicht möglich. Untersuchungen zu dieser Thematik und die Implementierung der entsprechenden Software-Komponenten sollten als weitere Maßnahme im Programmzeitraum vorgesehen werden. Dabei sollte möglichst bald ausgenutzt werden, dass mit der kontinuierlichen Frequenzabdeckung im VLBI2010-Setup eine Genauigkeitssteigerung für die Observablen erreicht werden kann.

Der Zugriff auf einen eigenen VLBI-Korrelator ist auch für zukünftige VLBI-Beobachtungsprogramme von strategischer Bedeutung. Neben den Routinebeobachtungsreihen zum Erdmonitoring werden neue Aufgaben in der Weltraumlagerung von planetaren Missionen gesehen, die nur mit echtzeitnaher VLBI erfolgreich sein können. Der Übergang zum VLBI2010 Standard, der mit dem TwinTeleskop-Projekt in Wettzell begonnen wurde, wird über den Korrelatorausbau seine Fortsetzung finden müssen. Damit würde der jetzige und zukünftige Produktkatalog des IVS in der gewohnten Kontinuität mit den qualitativ und quantitativ hochwertigen VLBI-Beiträgen aus Deutschland weiterhin bedient.

2.3.8 Zielstellungen für VLBI

Mit den neu installierten Twin-Radioteleskopen steht zusammen mit dem bestehenden 20m Radioteleskop in Wettzell ein Array aus drei Teleskopen zur Verfügung. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten in der Beobachtungsstrategie und Zielstellungen. Eines der VLBI2010 Ziele, die kontinuierliche Erdrotationsbeobachtungen durchführen zu können, wird mit dem TTW-Projekt erreicht. Erstmals wird mit Wettzell ein kontinuierliches Interferogramm möglich, wenn ständig eines der Radioteleskope auf einer Radioquelle VLBI-Beobachtungen macht, während das andere einen Quellenwechsel vornimmt. Durch Zusammenschaltung bei gleicher Ausrichtung der Radioteleskope kann die Empfindlichkeit erhöht werden. Zudem kann die "Nullbasislinie" zwischen den Teleskopen zur relativen Kalibrierung verwendet werden. Durch eine konsequente Implementation der VLBI2010 Ziele und Tests neuer Technologien (Empfänger-, Feedhorn- und Dewar-Technologie, DBBC) spielt das Geodätische Observatorium eine Schlüsselrolle innerhalb des IVS. Das 20m RTW soll

auch nach der Inbetriebnahme der TTW weiter in Betrieb bleiben, um mittels Parallelbeobachtungen die Kontinuität des Referenzpunktes im IVS-Netz sicherzustellen. Durch Nachrüsten mit Feedhorn und Empfänger für die VLBI2010-Frequenzen kann das Teleskop zur Analyse von Quellenstrukturen und dem Aufbau von Quellenkatalogen in den neuen Frequenzbändern mitarbeiten, Aufgaben, für welche große Instrumente erforderlich sind.

Die kombinierte Nutzung von VLBI-Sendern, Laserreflektoren, etc. auf Satelliten kann dazu dienen, die entsprechenden Referenzsysteme durch Kollokation am Satelliten zu verknüpfen. Hier könnten zudem Sensoren/Sender auf der Mondoberfläche oder im Mondorbit zur Verknüpfung der Referenzsysteme und zum Studium des Mondes dienen. Die FGS beteiligt sich an entsprechenden nationalen und internationalen Projekten. Zur Verknüpfung der Referenzsysteme ist insbesondere auch die Beobachtung von GNSS Satelliten mit VLBI. Interessant zur relativen Kalibrierung der Messsysteme ist auch die Bestückung eines Höhenforschungsflugzeugs mit einem VLBI-Sender und einem Laser-Retroreflektor. Ein entsprechendes Konzept soll studiert werden. Die Radioteleskope der FGS werden an internationalen Projekten zur differentiellen VLBI-Messung von interplanetaren Raumsonden teilnehmen. Der entsprechende Beitrag zur Verknüpfung von zälestischem und dynamischem Referenzsystem soll untersucht werden. Durch die differentielle, abwechselnde Beobachtung von herkömmlichen Radioquellen mit künstlichen Satellitensendern können bei bekanntem Satellitenorbit und gleichzeitiger Einmessung des Satelliten mit VLBI-Methoden Troposphäreneffekte als Hauptstörgröße in den VLBI-Messungen vermindert werden.

Zur Erhöhung der Messgenauigkeit ist ein besseres Verständnis von Einflüssen auf den mechanischen und elektrischen Referenzpunkt bzw. auf die Phasen- und Laufzeitkalibrierung erforderlich. Zur Überwachung der Strukturveränderungen aufgrund von temperaturbedingten und azimut- bzw. elevationsstellungsabhängigen Einflüssen sollen Monitoring-Untersuchungen dienen. Im Rahmen eines Pilotprojektes sollen Veränderungen von mechanischem und elektrischem Referenzpunkt bzw. der Phasen- und Laufzeitkalibrierung (Einkopplung des Zeitreferenzpulses) und Laufzeitvariationen durch Kabelbiegungen, etc. sowie der Einsatz von Lichtwellenleitern untersucht werden. Der Beitrag von Wasserdampfadiometern zur Genauigkeit der Troposphärenmodellierung, sowie der Einbezug neuartiger Möglichkeiten zur Messung der räumlichen Verteilung des Wasserdampfes mittels Sauerstoff-Spektrallinien soll weiter untersucht werden.

Automatisierung und Fernsteuerung ("e-control") der Radioteleskope soll weiter ausgebaut und im täglichen Betrieb genutzt werden. Dazu gehören die Erfassung von Zusatzparametern für die Analyse zur Verbesserung der Beobachtungsreihen sowie die Überwachung von interferierenden Störsignalen (RFI). Die echtzeitnahe Datenübertragung im Rahmen von e-VLBI und e-Transfer (nicht nur von und nach Wettzell) soll weiter ausgebaut werden, die in Wettzell entwickelte Software für Fernsteuerung "e-control" bildet hierfür eine gute Grundlage.

Der Korrelationsbetrieb für Sessionen, die mit Beteiligung deutscher Radioteleskope durchgeführt werden soll aufrechterhalten und erweitert werden. Hierzu beteiligt sich die FGS am Betrieb und der Weiterentwicklung des Software-Korrelators am MPIfR. Für die geodätische Anwendung wird auf Entwicklungen innerhalb des IVS zurückgegriffen. Zur Verbesserung der Ergebnisqualität soll Fringe-fitting-Prozess optimiert werden. Eine Bestimmung der Laufzeitdifferenzen über eine Gesamtausgleichung über alle Kanäle verspricht eine Genauigkeitssteigerung. Die Voraussetzungen für eine echtzeitnahe Korrelation, Nachbereitung und Ex-

port der Ergebnisse soll geschaffen werden. Hierzu ist die Entwicklung und Implementierung von Routinen für automatische Prozessierungen von der Vorbereitung bis zur Qualitätskontrolle erforderlich.

2.4 Laserdistanzmessung

2.4.1 Stand der Arbeiten

Die Laserentfernungsmessung (Satellite Laser Ranging, SLR) ist, im Gegensatz zu den mikrowellengestützten Raumverfahren wie VLBI und GNSS, ein optisches Pulslaufzeitverfahren. Es werden Laufzeiten von kurzen Laserpulsen zwischen Bodenstationen und künstlichen Erdsatelliten (bzw. dem Mond) absolut mit einer Genauigkeit von besser als 1cm gemessen. Konzeptbedingt sind SLR-Messungen im Vergleich zu den Mikrowellenverfahren mit den geringsten systematischen Fehlern behaftet. Das Geodätische Observatorium Wettzell trägt im Rahmen des International Laser Ranging Service (ILRS) mit regelmäßigen Messungen zu allen unterstützten Satellitenmissionen bei. Neben rein geodätisch motivierten Satellitenmissionen wie LAGEOS, STELLA und ETALON, welche unter anderem zur Bestimmung des ITRF und dessen Variation über lange Zeiträume hinweg herangezogen werden, erstreckt sich die heutige Beobachtungspalette zusätzlich über GNSS-, Altimetrie- und Erderkundungssatelliten bis hin zu Zeitübertragungs- und Transpondermissionen (siehe Abschnitt 2.4.5). Aufgrund der konzeptionellen Einfachheit des Messverfahrens ist die Laserentfernungsmessung im Rahmen von Kombinationslösungen als Lieferant des Maßstabsfaktors sowie des Ursprungs unerlässlich. Da Referenzsysteme in der Regel aus Kombinationslösungen aller geodätischen Raumverfahren abgeleitet werden, fällt der Laserentfernungsmessung die Rolle eines Kalibrierdienstes zu. Dementsprechend muss dieser Aufgabenstellung aus experimenteller Sicht besonders Rechnung getragen werden.

Das geodätische Observatorium Wettzell betreibt nunmehr seit 1991 das Wettzell Laser Ranging System (WLRS) mit einer Produktivität von über 6000 gemessenen Passagen pro Jahr. Durch den monostatischen Aufbau und einer Apertur von 75cm ist dieses System für die Entfernungsmessungen zu hochfliegenden Satelliten bis zum geostationären Orbit und zum Mond geeignet. In den letzten Jahren durchlief das WLRS eine Konsolidierungsphase, um den ständig gestiegenen Erwartungen an die Messgenauigkeit und der stark gestiegenen Anzahl von unterstützten Satellitenmissionen gerecht zu werden. Daher konnte die Mondentfernungsmessung nicht in der ursprünglich vorgesehenen Weise unterstützt werden. Neben der Installation modernster Detektortechnik und dem Einsatz eines neuen auf dem Observatorium Wettzell entwickelten ereignisgesteuerten Timers wurde auch die Erneuerung der Kuppel sowie deren Ansteuerung und die softwaretechnische Anpassung des Kontrollsystems vorgenommen. Das WLRS unterstützt nun die neuen erweiterten Datenformate des ILRS, wie CPF-Vorhersagen und Normalpunktdateien im CRD-Format. Außerdem wurden die Möglichkeiten zur Erprobung neuer Technologien an diesem System erweitert und verwendet.

2.4.2 Das Wettzell Laser Ranging System (WLRS)

Mit der Inbetriebnahme des SOS-W teilen sich zwei Laser-Distanzmesssysteme die Beobachtungslast des Observatoriums und unterstützen mehr als 30 Missionen entsprechend der Vorgaben des ILRS. Durch den Wegfall vieler LEO Satellitenpassagen aus dem Beobachtungsplan des WLRS kann das WLRS für seine ursprüngliche Primäraufgabe, nämlich die Beobachtung von HEO Satelliten einschließlich LAGEOS und dem Mond wieder optimiert werden. Dazu sind einige Anpassungen an dem Kontrollsystem der Beobachtungssteuerung notwendig. Der Aufwand für diese Anpassungen wurde in dem Forschergruppenprojekt „584 – Erdrotation“ im Rahmen des Projekts P5 als Arbeitspa-



Abbildung 2.3: Installation des neuen SOS-W Teleskops im Juli 2008

ket bereits berücksichtigt und wird durch die DFG im Zeitraum 2009 – 2011 gefördert. Es wird beabsichtigt diese Änderungen des Kontrollsystems in enger Abstimmung mit der LLR Gruppe in Grasse (F) auszuführen. Das OCA betreibt die erfolgreichste LLR Station des ILRS und hat eine weitreichende Unterstützung bei der Integration und Validation der erforderlichen Systemfunktionen angeboten. Darüber hinaus besteht das Ziel den Automatisierungsgrad des WLRS weiter zu erhöhen. An dieser Stelle fließen maßgeblich die unter Abschnitt 2.9.4 genannten Beiträge ein.

2.4.3 Das Satellite Observing System Wettzell (SOS-W)

Um das WLRS während der geplanten Überarbeitungsphase und der darauf folgenden Zeit zu entlasten, wurde am Geodätischen Observatorium Wettzell der Betrieb des Satellite Observing Systems (SOS-W) geplant, welches einen weitgehend automatisierten Messbetrieb ermöglichen soll. Die Konzeption des SOS-W zielt insbesondere auf die Minimierung von systematischen Fehlern in der Laserentfernungsmessung ab, wobei der nutzbare Entfernungsbereich aufgrund des bistatischen Aufbaus des Teleskop auch Altimetriemissionen mit niedrigem Orbit wie GRACE und GOCE abdeckt und andererseits mindestens die LAGEOS-Bahnen mit einschließt. Abbildung 2.3 gibt einen Eindruck von der Installation des neuen SOS-W Teleskops.

Abgesehen von der atmosphärischen Refraktion ist die Reduktion der Messung von der Reflektoranzordnung auf das Massenzentrum der Satelliten der größte verbleibende systematische Messfehler bei der Satellitenentfernungsmessung. Das SOS-W soll an beiden Stellen eine Verringerung dieser Fehlereinflüsse liefern. Die Anwendung eines Titan-Saphir Lasers mit hoher Repetitionsrate (1 kHz) und die gleichzeitige Verwendung der optischen Wellenlängen von 850nm und 425nm liefern die erforderlichen Ansätze für eine höhere Messgenauigkeit.

Die Aufteilung der Laserfrequenzen über den sichtbaren Bereich des Lichtes hinweg liefert einen großen Dispersionsbeitrag der Atmosphäre und ermöglicht somit eine verbesserte Korrektur dieses Einflusses. Die hohe Repetitionsrate des Lasers verringert hingegen die statistische Streuung der Entfernungsmessungen und liefert eine ausreichende Dichte von Messwerten, um etwaige geometrische Einflüsse der Reflektoranzordnung der einzelnen Satelliten zu korrigieren (messtechnische Bestimmung der Übertragungsfunktion der Reflektoren). Mit der ho-

hen Repetitionsrate des Lasers geht eine Verminderung der Intensität der Einzelpulse einher. Dies verringert zwar die Anzahl der erfolgreichen Einzelmessungen, sorgt aber auf der anderen Seite dafür, dass intensitätsabhängige Fehlersystematiken vermieden werden. Das Potential der Verwendung zweier Frequenzen zur Verbesserung der atmosphärischen Korrektur soll anhand der Beobachtungsdaten untersucht werden.

Zur Unterstützung von Kombinationslösungen erlaubt der Strahlengang des SOS-W einen Parallaxenausgleich für terrestrische Vermessungen, um Distanzen zu lokalen Netzwerken und anderen Messsystemen, insbesondere zu den VLBI-Antennen durch Laufzeitmessungen direkt überprüfen zu können.

2.4.4 TIGO SLR

Das TIGO-SLR-Modul in Concepción hat sich vor dem Erdbeben am 27.02.2010 zu den produktivsten und genauesten SLR-Stationen des globalen Stationsnetzes entwickelt. Nach der Jahresstatistik des ILRS belegte die Station 2009 den achten Rang im Gesamtvolumen der Daten, einen Platz hinter Wettzell. Bei den hochfliegenden Navigationsatelliten (GPS, GLONASS, Galileo) liegt TIGO bezüglich Produktivität weltweit sogar auf dem vierten und bei Lageos auf dem dritten Rang. Die Datenqualität liegt dabei ebenfalls durchgehend in der Spitzengruppe.

Das TIGO-SLR-System nimmt von seiner technischen Konzeption sowie seiner geographischen Lage her eine gewisse Sonderstellung im Stationsnetz des ILRS ein. Zum einen handelt es sich um das derzeit einzige operative Titan-Saphir-System, das im Infraroten arbeitet. Außerdem verfügt es über einen mit einer Atomuhr synchronisierbaren Laser-Oszillator. Durch diesen Umstand ist es besonders für Experimente im Bereich optischer Zeitübertragung geeignet.

2.4.5 Einwegstreckenmessung mit Transponder

Das Geodätische Observatorium Wettzell ermöglicht aufgrund seiner technischen Voraussetzungen moderne Verfahren der Einwegstreckenmessung und Transponderanwendungen. Eine Beteiligung zum Zeitvergleich und zur Zeitübertragung ist für die ACES Mission auf der ISS vorgesehen (2013 – 2015). An der Vorreitermission T2L2 ist das WLRS bereits seit 2008 beteiligt. Der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) wird seit 2009 angemessen. Während der Schwerpunkt der Beobachtungen im Rahmen der LRO Mission bei der Verbesserung der Bahnbestimmung (Gravitationsfeld) im Lunarorbit liegt und noch keine hochgenaue Zeitübertragung erfordert, kommt es bei dem ACES Projekt auf eine exakte Zeitübertragung mit einer Genauigkeit von besser als 50 ps zwischen der Master-Clock des Geodätischen Observatoriums Wettzell und der Pharaohuhr im erdnahen Orbit an. Wettzell kommt aufgrund seines für geodätische Beobachtungen optimierten und hochwertigen Zeitsystems (Maser) im Rahmen des ILRS eine besondere Bedeutung zu. Die optische Zeitübertragung zwischen einem Ensemble von Bodenstationen und ACES wurde von der ESA zum Baseline-Konzept von ACES hinzugefügt (siehe Abschnitt 2.4.5). Die erforderlichen Beobachtungen werden aufgrund der Wellenlängenspezifikation (532 nm) mit dem WLRS zu beobachten sein.

2.4.6 Neue Anwendungen der Lasertechniken (Pilotprojekt)

Moderne Satellitenmissionen zu den äußeren Planeten des Sonnensystems stoßen bereits heute an die Kapazitätsgrenze ihrer Datenübertragungssysteme (Telemetrie), so dass beispielsweise hoch aufgelöste Fotografien sich nicht mehr zeitnah zur Erde übertragen lassen. Dies ist aufgrund des mit größerem Abstand sich stark verschlechternden Signal-zu-Rauschverhältnis gegeben. Daher gewinnen optische Methoden der Datenübertragung (Laserkommunikation) für solche Missionen stark an Bedeutung. Bei geeigneter Struktur dieser optischen Teleme-

trieaussendungen lassen sie sich auch für präzise Entfernungsmessungen zwischen Satellit und Bodenstation verwenden womit sich die Bahnbestimmung solcher Sonden verbessern ließe. Dieses Verfahren könnte ganz in Analogie zu den GNSS-Systemen, allerdings auf optischem Wege, realisiert werden. Mit einer Studie sollen die technologischen Voraussetzungen (einschließlich Bodenstation) untersucht und ein Konzept zur Nutzung entwickelt werden. An dieser Stelle sind die Erfahrungen und Technologien der Laserkommunikation von großer Bedeutung.

Technologisch gesehen wird die Laserentfernungsmessung im ILRS als asynchrones Messverfahren eingesetzt. Zwischen den Laserpulsen und dem zugrunde liegenden Zeitsystem besteht kein starrer zeitlicher Bezug. Erst über die Messung der Startepoche des Laserpulses wird eine Beziehung zum Zeitsystem hergestellt. Beim SOS-W ist es über einen Hochfrequenzgenerator möglich das Zeitsystem direkt mit dem Laser zu synchronisieren. Eine hochgenaue zeitliche Synchronisation der Laserpulse ermöglicht die genaue Kenntnis des Ortes eines Laserpulses zu einer vorgegebenen Epoche. Mit Hilfe einer photokonduktiven Antenne können so deterministisch breitbandige THz-Mikrowellenpulse im Raum erzeugt werden. Die Eignung dieses Verfahrens für die Nutzung als Transponderanwendung soll untersucht und ein Konzept dazu entwickelt werden.

2.4.7 Zielstellungen Laserdistanzmessung

Die beiden SLR Messsysteme in Wettzell, das SOS-W und das WLRS, sollen im Parallelbetrieb optimiert genutzt werden. Dies beinhaltet einen weitgehend automatisierten und ferngesteuerten Betrieb der beiden Instrumente von einem Arbeitsplatz aus. Gegenwärtig wird das WLRS-Kontrollsystem zur Messung von hohen Zielen angepasst. Das WLRS soll in Zukunft bevorzugt für die Distanzmessung zu HEO Satelliten sowie zum Mond genutzt werden. Der Gewinn durch Zweifrequenzmessungen mit dem SOS-W soll weitergehend untersucht werden. Die Vielzahl an verfügbaren geodätisch genutzten Satelliten, welche mit Retroreflektoren ausgestattet sind, machen neue Beobachtungsstrategien erforderlich. Es sollen optimierte Beobachtungsstrategien entwickelt und implementiert werden, die ein alternierendes Anmessen mehrerer Satelliten durch einen schnellen Wechsel zwischen den Zielen erlaubt und die hohe Pulsrepetitionsrate für die Mittelung optimal nutzen. Neue Möglichkeiten ergeben sich aus dem gemeinsamen Einsatz der beiden Laserinstrumente SOS-W und WLRS.

Das WLRS wird zusätzlich zu Zweiweg-Distanzmessungen auch für Transponderanwendungen im Rahmen internationaler Programme eingesetzt werden. Dies beinhaltet Einweg-Distanzmessungen zu entfernten Zielen wie Sonden um den Mond (wie LRO) und in Zukunft Zielen auf der Mondoberfläche oder interplanetare Raumsonden. Insbesondere beteiligt sich das WLRS an Experimenten zur präzisen Zeitübertragung zu Satelliten mittels Transpondermessungen. Hierzu ist eine präzise Anbindung der Pulsepochen an die Zeitskala der Station erforderlich. Im Rahmen des ELT-Experiments auf ACES auf der internationalen Raumstation plant die FGS einen Service zur Trefferprognose und Datenanalyse aufzubauen, s. Abschnitt 2.2.2.

Im Rahmen von Pilotprojekten sollen zum einen die technischen Voraussetzungen untersucht und ein Konzept entwickelt werden zur Nutzung von optischen Telemetrieaussendungen zur präzisen Entfernungsmessung zwischen Satellit und Bodenstation, zum andern die mögliche Nutzung photokonduktiver Antennen zur Erzeugung von breitbandigen Mikrowellenpulse mittels Laser für Transponderanwendungen untersucht werden.

2.5 GNSS Beobachtungsstationen

Die bevorstehende Einführung und Verfügbarkeit des Satellitensystems Galileo wird Auswirkungen auf die Hardware der GNSS-Beobachtungsstationen haben. Schrittweise sollten die Antennen und Empfänger erweitert werden. Die Abgabe von Datenströmen sollte auf alle Stationen ausgedehnt werden. Notwendige Erfahrungen und Entwicklungen für das System Galileo werden bereits im CONGO Realtime Netz (Montenbruck et al., 2009) gemacht. In diesem Zusammenhang ist auch die Mitarbeit bei der Standardisierung im RTCM zur Übertragung von weiteren Beobachtungstypen und der Erweiterung auf Galileo zu sehen.

Echtzeitstationsnetze haben mit den Entwicklungen der letzten Jahre zunehmend an Bedeutung gewonnen. Zur zeitgerechten Erstellung der „near realtime“ Produkte ist deren Nutzung unumgänglich. Die Bereitstellung der Caster für die Echtzeitnetze bietet dabei die entscheidende Grundlage sowohl bei der Erfassung der Rohdaten als auch bei der Abgabe und Verbreitung der Produkte. Zukünftige Produktentwicklungen im Echtzeitbereich werden dadurch ermöglicht.

2.5.1 Stand der Arbeiten

Von den durch das BKG betriebenen IGS-Stationen werden bereits von 14 Stationen Daten über Datenströme im RTCM-Format abgegeben. Zusätzlich stellt das BKG drei mit galileo-tauglichen Empfängern und Antennen ausgerüstete Stationen des CONGO Realtime Netzes in Wetzell, Concepción und O'Higgins.

Das DGFI hat seit 1998 15 permanente GNSS-Stationen installiert. Die Stationen werden von lokalen Partnern betrieben, welche für einen störungsfreien Betrieb und den Transfer der Trackingdaten besorgt sind. Die Stationen werden im Rahmen verschiedener Projekte betrieben: Neun Stationen sind in Südamerika installiert und liefern Daten zur Verdichtung des ITRF im Rahmen des südamerikanischen Referenzsystems (SIRGAS) (Sanchez und Brunini, 2009). Fünf davon sind in der Nähe von Pegelstationen installiert und tragen zur Vereinheitlichung der Höhensysteme im Rahmen des IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Projects (TIGA) bei. Fünf weitere Permanentstationen wurden im Rahmen des ALPS-GPS QUAKENET Projekts des Alpine Space Programmes des European Community Initiative Programme INTERREG IIB entlang der nördlichen Grenze der Alpen installiert. Zusammen mit 25 weiteren Stationen liefern sie GNSS-Daten zur Bestimmung von Krustendeformationen und zur Verbesserung des Schutzes vor Naturkatastrophen im Alpenbogen.

2.5.2 Zielstellungen GNSS

Durch die Einführung neuer Beobachtungsgrößen, wie z.B. die dritte Frequenz bei GPS, sowie neuer Satellitensysteme, wie Galileo und Compass, bleibt die Positionierung auch weiterhin ein sehr innovatives und dynamisches Forschungsgebiet. Die Übertragung der Daten der Beobachtungsstation in Echtzeit wird für mehr und mehr Stationen realisiert. Durch den Ausbau der Telekommunikationsinfrastruktur erhöhen sich die Zuverlässigkeit der Datenübertragung, die verfügbaren Bandbreiten sowie die Erreichbarkeit in infrastrukturell derzeit noch schlechter versorgten Gebieten. Die Entwicklung wird daher auch zukünftig zu immer breiteren Einsatz- und weiteren Nutzungsmöglichkeiten in Wissenschaft und Praxis führen.

Für den Einsatz in Referenzstationsnetzen sollte eine möglichst einheitliche Hardware verwendet werden. Unterschiede bei den Empfangsantennen führen trotz sorgfältiger Kalibrierungen nach wie vor zu nicht modellierbaren systematischen Fehlern in den Auswertungen.

Der Betrieb von Referenzstationen ist heute ein weitgehend automatisierter Prozess. Er bedarf aber nach wie vor der ständigen Wartung und Kontrolle, damit die Daten unterbrechungsfrei und in Echtzeit zur Verfügung stehen. Durch die rasante technische Entwicklung auf dem Gebiet sind die konzeptionelle Ausrichtung der Stationen ständig zu überprüfen, zu modernisieren und an die Weiterentwicklung aller Komponenten anzupassen. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse sollten im Stationsdesign und in der Sensorik berücksichtigt werden.

Es besteht das Ziel, die Ursachen des (relativen) Meeresspiegelanstieges durch Kombination verschiedener Messtechniken auf Stationen im Küstenbereich zu separieren.

Im Rahmen der Auswertung haben die Modelle erheblich an Komplexität gewonnen. Um das den Messungen innewohnende Genauigkeitspotential auszuschöpfen, sind Reprozessierungen der Daten nach einheitlichen Standards und mit einheitlichen Softwareversionen zur Generierung homogener Zeitreihen unerlässlich. Unterschiedliche Umgebungsbedingungen (Niederschlag, Schnee, etc.) und dadurch veränderte Multipathbedingungen im Nahfeld der Antennen können sich beispielsweise auf die Troposphärenparameterschätzung und die Koordinatenbestimmung auswirken.

Für das GNSS-Echtzeitstationsnetz ergeben sich neue Möglichkeiten und Herausforderungen durch die Vielzahl von verfügbaren Stationen. Zukünftig ist die Stationsverteilung zu verbessern und die Verbreitungswege der Echtzeitdaten zu optimieren, um Engpässe bei der Versorgung der Nutzer zu vermeiden. Softwareentwicklungen im Bereich der Caster sind notwendig, um insbesondere Administration und Monitoring zu verbessern.

Die Erweiterung der Stationen für das Satellitensystem Galileo soll es dem BKG ermöglichen, Kompetenzen und Produkte für die nicht-offenen Dienste von Galileo zu erbringen.

2.6 Gravimetrie

2.6.1 Wettzell

In der terrestrischen Gravimetrie werden seit 1988 hochauflösende kontinuierliche Schweremessungen in der Station Wettzell durchgeführt. Hierzu ist ein Supraleitendes Gravimeter eingesetzt, das eine Auflösung von ca. $0,1 \text{ nms}^{-2}$ bei einer kontinuierlichen Nullpunktdrift von nicht mehr als 10 bis 20 nms^{-2} besitzt. Das Supraleitende Gravimeter misst die zeitlichen Schwereänderungen und ermöglicht genaue Analysen der Erdzeiten, Meeresauflastwirkungen sowie der Wirkungen von Polbewegung, atmosphärischen Einflüssen und Massenverlagerungen in der Erde, beispielsweise als Folge hydrologischer Prozesse. Entsprechende Modelle verbessern auch die Messdaten geometrisch arbeitender geodätischer Raumverfahren. Die Daten des Supraleitenden Gravimeters werden im Rahmen des GGP-Projektes (Grossley and Hinderer, 2009) u.a. zur kontinuierlichen Überwachung der zeitlichen Variationen des Schwerfeldes, der Untersuchung von Eigenschwingungen des Erdkörpers, zur Validierung der Ergebnisse der Satellitenschweremissionen und zur Sicherung eines globalen Schwerereferenzsystems durch wiederholte Vergleichsmessungen von Absolutgravimetern an SG-Standorten verwendet.

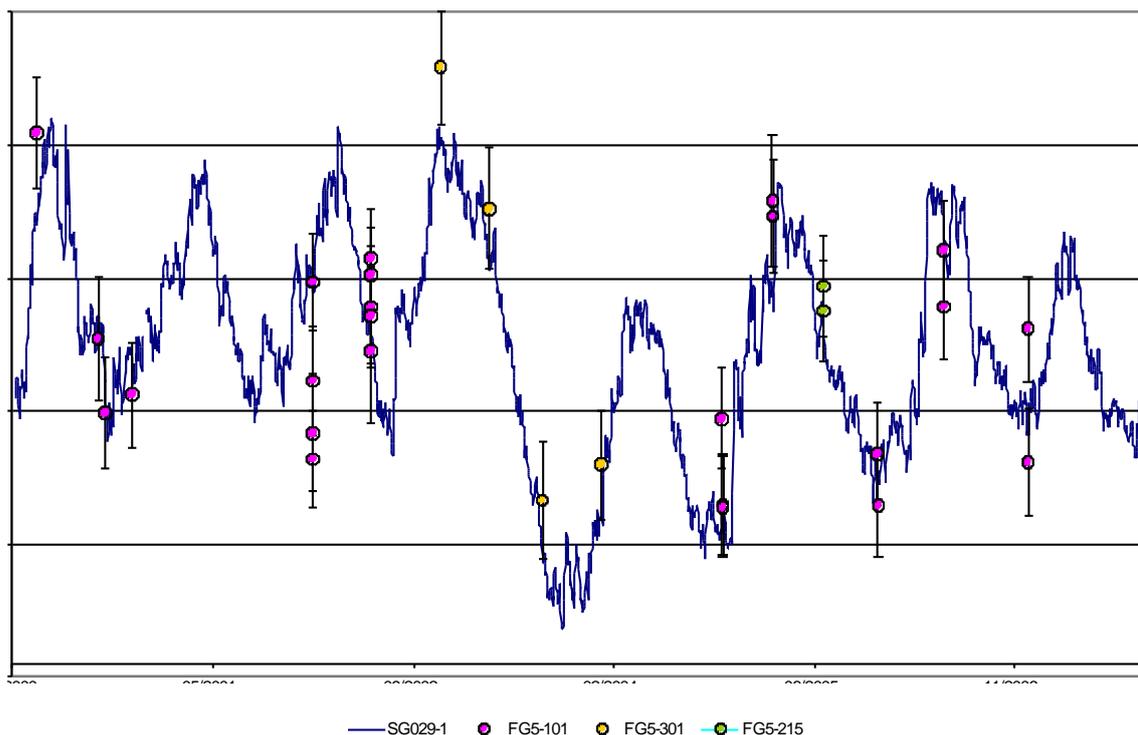


Abbildung 2.4: Residuale Schwerezeitreihe aus der Kombination des Supraleitenden Gravimeters SG 29 mit den Messungen der Absolutgravimeter FG5-101, FG5-301 und FG5-215 für den Zeitraum 2000-2007, Schwerewerte in nm/s^2 .



Abbildung 2.5: Supraleitendes Gravimeter SG 29 (links) und Absolutgravimeter FG5-301 (rechts)

In Wettzell werden seit vielen Jahren durch das BKG diese Messungen mindestens halbjährlich mit Absolutgravimetern (AG) vom Typ FG5 durchgeführt. Die kontinuierliche Kombination beider Verfahren (SG und AG) gestattet sowohl die Überwachung der Drift und des Maßstabes der SG als auch die Kontrolle der Niveaustabilität der AG (Abbildung 2.4, Abbildung 2.5).

Durch den Bau und den Betrieb der neuen Twin-Teleskope in unmittelbarer Nachbarschaft des Gravimeterhauses ergab sich die Notwendigkeit einer Verlegung des Standortes der Gravimeter auf dem Stationsgelände in Wettzell. Mit der Realisierung des neuen Gravimeterhauses konnten

die Möglichkeiten für gravimetrische Forschungen und die Realisierung des gravimetrischen Referenzsystems für die Bundesrepublik Deutschland verbessert werden. Neben zwei Pfeilern für Supraleitende Gravimeter stehen jetzt auch vier Pfeiler für Absolutgravimeter zur Verfügung. Somit erfüllt die Fundamentalstation Wettzell jetzt auch alle Voraussetzungen dafür, als regionale Vergleichsstation für Absolutgravimeter zur Verfügung zu stehen.

2.6.2 TIGO

Seit Ende 2002 werden Schwerevariationen auf der Station mit dem Supraleitenden Gravimeter SG38 aufgezeichnet. Seit Juni 2006 wurden parallel dazu wöchentliche Messungen mit dem Absolutgravimeter FG5-227 durchgeführt. Die Kombination aus beiden Messungen ergibt zuverlässige Angaben zu Drift und Eichfaktor des SG und bestätigt die ausgeprägten saisonalen Variationen (Abbildung 2.6). Nach dem Umbau des Kühlsystems des SG38 ab Mitte 2008 und der Neuinstallation im Dezember 2009 besteht die Möglichkeit die saisonale und langfristigen Schwereänderungen im Vergleich mit den geodätischen Raumverfahren und im Hinblick auf Wasserspeicheränderungen zu untersuchen.

2.6.3 Weiterentwicklung von gravimetrischen Korrekturmodellen

Zeitliche Schwerevariationen werden hauptsächlich durch die Gezeitenkräfte von Sonne und Mond sowie die daraus resultierenden Deformationen und wechselnden Auflasten (Ozeanauflastzeiten) hervorgerufen. Aus langjährigen Zeitreihen können diese Effekte mittels harmonischer Analyse sehr genau bestimmt werden. Weiterhin bewirken die Polbewegung der Erde sowie atmosphärische hydrologische Massenvariationen Schwereeffekte, die nur ca. 5% des Gesamtsignals ausmachen. Während der langperiodische Effekt der Polbewegung mit geringer Unsicherheit aus den Polkoordinaten des IERS berechnet werden kann, stehen Verbesserungen bei der Modellierung des Einflusses von Atmosphäre und kontinentaler Hydrologie im Fokus aktueller Untersuchungen.

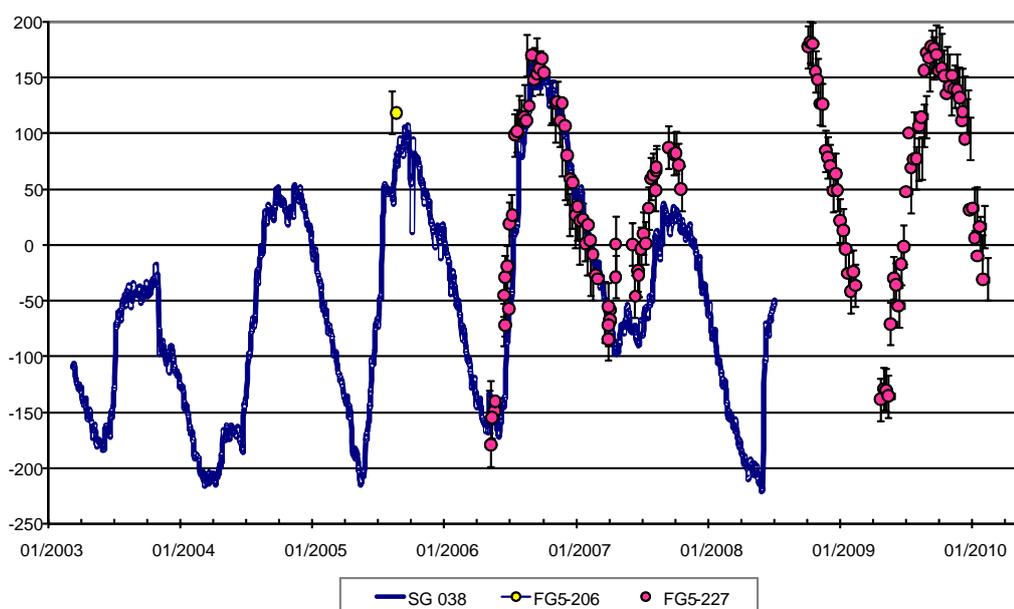


Abbildung 2.6: Residuale Schwerezeitreihe TIGO aus Kombination des Supraleitenden Gravimeters SG 038 mit den Messungen des Absolutgravimeters FG5-227 und unter Berücksichtigung einer Messung mit FG5-206 (EOST, Frankreich) (Schwerewerte in nm/s^2)

Atmosphärische Reduktion von Schweremessungen

Mit dem bisher üblichen Verfahren der Regression der gezeitenreduzierten Schwerezeitreihen mit dem lokalen Luftdruck können etwa 90-95 % des atmosphärischen Effektes eliminiert werden. Für die heute im Rahmen von GGOS geforderte Genauigkeit von 10^{-9} ist dies nicht mehr ausreichend. Weiterhin ist eine möglichst vollständige Elimination atmosphärischer Effekte Voraussetzung für die Identifikation von hydrologischen Signalen in Zeitreihen supraleitender Gravimeter, beispielsweise für den Vergleich mit der Satelliten-Schwerefeldmission GRACE (SPP-Projekt TASMAGOG) oder die Untersuchung lokaler Wasserspeicheränderungen (Projekt „Hygra“ in Kooperation mit GFZ)

Auf der Basis des hochaufgelösten europäischen (COSMO-EU) und des globalen (GM192) operativen Wettermodells des Deutschen Wetterdienstes werden die Dichteverteilung in der Atmosphäre die daraus resultierende Attraktions- und Deformationswirkung für das Gravimeter zu ermittelt. Testrechnungen haben gezeigt, dass die Atmosphäre global und bis zu einer Höhe von mindestens 50 km berücksichtigt werden muss, um eine Fehlergrenze von 1 nm/s^2 nicht zu überschreiten. Die auf diese Weise reduzierten Gravimeterzeitreihen zeigen weniger Restsignal in den Residuen als die luftdruckreduzierten Zeitreihen (Abbildung 2.7).

Um diese hochwertige Modellierung auch für andere Stationen des globalen Netzwerks supraleitender Gravimeter (GGP) regelmäßig zur Verfügung zu stellen, ist die Einrichtung eines Routinebetriebs geplant, der die atmosphärischen Korrekturdaten für jede Station täglich berechnet und auf einem Server zur Verfügung stellt.

Modellierung kontinentaler Wasserspeicheränderungen in Bezug auf Schweremessungen

Nach Reduktion um die Einflüsse von Gezeiten, Polbewegung und Atmosphäre sind in den residualen Zeitreihen der supraleitenden Gravimeter signifikante Variationen sichtbar. Diese werden hauptsächlich durch Änderungen im kontinentalen Wasserhaushalt verursacht. Dabei muss zwischen globalen und lokalen Effekten unterschieden werden. Globale Wasserspeicheränderungen wirken erst ab einer Entfernung von 150 km auf das Gravimeter und erreichen eine Amplitude von ca. $20\text{-}30 \text{ nm/s}^2$. Lokale hydrologische Effekte können je nach Umgebungsbedingungen, Topographie und Lage der Station deutlich größer sein, auf der Station

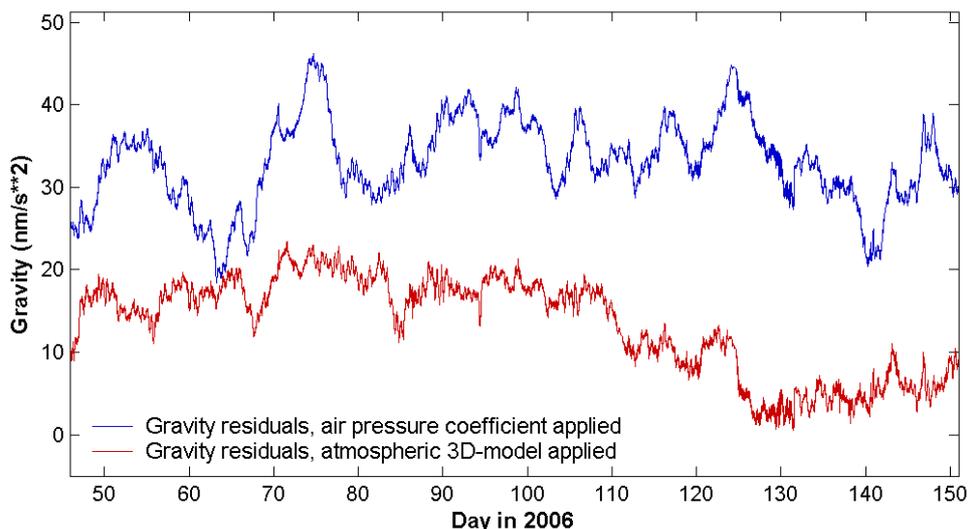


Abbildung 2.7: Zeitreihe des SG Bad Homburg, Residuen der Gezeitenanalyse mit verschiedenen atmosphärischen Reduktionsverfahren

Wetzell erreicht dieser Effekt bis zu 120 nm/s^2 . Sensitivitätsanalysen zeigen, dass mehr als $2/3$ dieses Signals von Massenvariationen aus einem Umkreis von 50 m um den Sensor erzeugt wird. Die Quantifizierung dieser Massenvariationen ist notwendig, um einen Vergleich mit den Schwerefeldvariationen aus der GRACE-Mission sowie globalen hydrologischen Modellen führen zu können. Desweiteren repräsentiert die hochauflösende Schwerezeitreihe eine vollständige Massenbilanz der eine hydrologische Modellierung gegenübergestellt werden kann.

Im Rahmen eines Projektes mit der Sektion Ingenieurhydrologie am Deutschen Geoforschungszentrum Potsdam GFZ werden im Bereich des Geodätischen Observatoriums Wetzell die lokalen hydrologischen Massenvariationen quantitativ erfasst. Die aus einer komplexen Modellierung berechneten Schwereänderungen am Ort des Gravimeters dienen einerseits der Validierung der hydrologischen Modelle und können andererseits zur Reduktion der Schwerezeitreihen herangezogen werden. Die Gegenüberstellung der berechneten hydrologischen Schwereänderungen mit den Messungen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Daher wurde im Bereich des neuen Gravimeterhauses ein entsprechendes Monitoringssystem dauerhaft installiert. Es ist geplant, nach einer Validierungsphase die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung in die Korrektur der Gravimeterzeitreihen einfließen zu lassen.

2.6.4 Zielstellungen

Die kontinuierlichen hochgenauen terrestrischen Messungen werden auf den Stationen Wetzell, Bad Homburg und Medicina mittels SG und AG fortgesetzt. Deren Kombination ergibt Zeitreihen mit höchster Genauigkeit und Langzeitstabilität und stellt den Schwerestandard sicher. Damit wird ein Beitrag zum Aufbau eines globalen Schwerereferenzsystems geleistet. Die gravimetrischen Korrekturmodelle werden weiterentwickelt. Die Modellierung atmosphärische Massenvariationen wird auf der Basis der Daten des DWD (COSMO-EU / GM192) durch Einbeziehung bisher unberücksichtigter Massenkomponenten, der Erweiterung der Modellhöhe und eine verbesserte Modellierung der Nahzone optimiert. Die Auswirkungen hydrologischer Massenvariationen werden hinsichtlich lokaler und globaler Effekte getrennt betrachtet. Das lokale Modell zur Attraktionswirkung lokaler Wasserspeicheränderungen im Umfeld des SG auf der Station Wetzell wird in Kooperation mit dem GFZ-Potsdam, Sektion 5.4 Ingenieurhydrologie, für beide Gravimeterstandorte weiterentwickelt (s. Abschnitt 2.8.2). Eine befristete Parallelregistrierung ermöglicht die Validierung der Modelle und dient der Separation von lokalen und regionalen hydrologischen Effekten. Die Berechnung von Attraktion und Deformation aus verschiedenen globalen Hydrologie-Modellen (LaD, GLDAS, WGHM) und deren Vergleich hinsichtlich bester Übereinstimmung mit den gravimetrischen Zeitreihen. Entwicklungen von Quantensensoren werden in Hinblick auf deren Anwendung in der Gravimetrie mit verfolgt.

2.7 Ringlaser

Die hochgenaue Bestimmung der Erdrotation ist für die Transformation vom terrestrischen Bezugsrahmen in den zälestischen Bezugsrahmen notwendig und wird heute durch die Methode der VLBI anhand der Beobachtung von Quasaren als festen Himmelsobjekten (Sternenkompass) realisiert. VLBI-Messungen werden durch einen Verbund von Radioteleskopen realisiert und stehen nicht kontinuierlich zur Verfügung. Gyroskope (Trägheitskompass) benötigen keinen externen Bezug und können kontinuierlich betrieben werden. Sie sind jedoch durch ihre lokale Anbindung an den Erdkörper, sowie ihre technische Stabilität begrenzt. Ringlaser realisieren die gegenwärtig höchstentwickelten Rotationssensoren. Sie können Drehraten von weniger als 1 pico-rad/s mit Integrationszeiten

von ca. 1 Stunde erfassen und sind eher durch die seismische Unruhe der Erde als durch die apparativen Eigenschaften begrenzt. Während in den vergangenen Jahren eine Steigerung der Sensorempfindlichkeit im Vordergrund stand, konzentrieren sich die Bemühungen jetzt auf die Verbesserung der Langzeitstabilität und auf die Verbesserung des Orientierungsmodells für große Ringlaser.

Das Forschungsprogramm der FGS weist für den Zeitraum von 2006 – 2010 eine Reihe von Entwicklungszielen im Bereich Ringlaser aus. Die geplanten Maßnahmen, also die Steigerung der Sensorempfindlichkeit und Langzeitstabilität durch den Einsatz von Gettermaterialien, die Modifikation des Vakuumrezipienten und der Einsatz neuer verbesserter Superspiegel sind in Neuseeland im Vorfeld eingehend getestet und nach Verifikation der Funktionen in den G-Ringlaser integriert worden. Sie zeigten die erwarteten Verbesserungen für die Sensorfunktionen. Ein wesentlicher Fortschritt für die Erweiterung der Langzeitstabilität des Ringlasers gelang durch den Einsatz der druckstabilisierenden Einhausung des Ringlasers und der geschlossenen Rückkopplungsschleife über den Vergleich der optischen Resonatorfrequenz und einem optischen Frequenzstandard (iodreferenzierter cw-Laser). Bei der Analyse der Zeitreihen der Ringlasermessungen können die Neigungssignale weitgehend korrigiert werden. Nur im tieffrequenten nicht-periodischen Bereich bestehen noch offene Fragen. Der Beitrag der Chandler-Bewegung zu den Ringlasermessungen, also ein sehr tieffrequentes Signal ist seither quantifizierbar. An der Kombination von den Ringlasermessungen mit der C04-Zeitreihe wird aktuell gearbeitet. Damit sind die Ziele des auslaufenden Forschungsprogramms weitgehend erreicht. Lediglich die Parallelbeobachtungen mit mehreren Ringlaser an verschiedenen thermisch stabilen Orten und die Integration eines GEOSensors in die Station TIGO konnte nicht realisiert werden, da das dazu notwendige Instrumentarium nicht beschafft werden konnte.

2.7.1 Stand der Arbeiten

Im Rahmen der Forschergruppe „FOR584 – Erdrotation“ wurden in der ersten Förderungsphase 2005 – 2008 einerseits Ringlasermessungen in die VLBI-Auswertungen integriert (Mendes et al., 2009), womit für die VLBI erstmalig der direkte Bezug zur instantanen Rotationsachse der Erde hergestellt wird. Andererseits lieferten FE-Modelle von Europa und dem unmittelbaren Bereich um den Ringlaser ein verbessertes Verständnis über die Auswirkungen von windinduziertem Strain in regionalen und lokalen Rotationsfeldern. Im zweiten Förderungsabschnitt bis 2012 steht eine Verbesserung des Orientierungsmodells unter Berücksichtigung der lokalen Hydrologie im Vordergrund.

Über den Zeitraum des letzten Forschungsprogramms ergaben sich am G-Ringlaser in Wettzell einige apparative Verbesserungen. Der Einbau aktueller technisch verbesserter Spiegel in den Strahlengang des Ringlasers hat die Güte Q des Resonators auf nahezu $5 \cdot 10^{12}$ gesteigert und das Auflösungsvermögen des Rotationssensors gegenüber dem vorherigen Zustand um einen Faktor 3 verbessert. Um die Langzeitstabilität des Sensors zu erhöhen, konnte die Ausgasrate von Wasserstoff in das He-Ne Gasgemisch durch den Einbau neuer Rohrleitungen in die Ringlaserkonstruktion stark reduziert werden. Der zusätzlich vorgenommene Einbau eines Getters in den Gasraum des Ringlasers vermeidet die Verschmutzung des Lasergases und damit einhergehend eine langsame Drift des Rotationssensors (Pritsch et al., 2007). Geringfügige Änderungen im Umgebungsluftdruck und der effektiven Temperatur des Ringlaserkörpers führten in der Vergangenheit zu einer Änderung des Skalenfaktors des Instrumentes und somit zu einer Drift des Messsignals. Durch Einschluss des Sensors in eine geregelte Druckkammer konnten diese Effekte stark vermindert werden. Abbildung 2.8 zeigt den aktuellen Zu-

stand des G-Ringlasers im Vergleich zu der Zeit vor den eingebrachten Verbesserungen.

Neben den apparativen Verbesserungen zur Vervollständigung des Sensormodells konnten auch im Bereich Orientierungsmodell einige Fortschritte erzielt werden. Im Rahmen der von der DFG geförderten Forschergruppe Erdrotation (FOR584), ist ein FE-Geländemodell für den zentraleuropäischen Bereich aufgestellt und mit Wind aus meteorologischen Modellen belastet worden. Die dabei durch Strain und Deformation verursachten lokalen Rotationssignale sind den Modellrechnungen nach um einiges zu klein um den Ringlaser zu beeinträchtigen. Ein hoch auflösendes lokales FE-Modell mit einer Kantenlänge von 10 km erzeugt größere Störungen, aber auch diese Einflüsse sind rechnerisch gerade erst in der Nähe der Rauschgrenze des Sensors. Von größerer Auswirkung haben sich Neigungseinflüsse der Umgebung auf den Ringlaser erwiesen, wobei der lokalen Hydrologie besondere Aufmerksamkeit zukommt. Eine Verbesserung der Modellierung der lokalen Sensororientierung steht im Rahmen der laufenden Förderung erst am Anfang.

Die Ringlaserarbeitsgruppe der FGS kooperiert international eng mit dem „Department of Physics and Astronomy“ der University of Canterbury (Neuseeland), dem Scripps Institution of Oceanography, La Jolla (USA), dem „Department of Laser Measurement and Navigation Systems“ der St.-Petersburg Electrotechnical University, dem Lehrstuhl für Laserphysik der Universität Pisa (Italien) und dem Department „Advanced Geodesy – Institute of Geodesy and Geophysics (E128) der TU Wien. National gibt es eine enge Kooperation mit dem Institut für Quantenoptik (Universität Hannover), dem „Department of Earth Sciences – Geophysics“ (LMU-München) und der Northrop-Gruman – LITEF GmbH. Mit diesen intensiven Partnerschaften werden die Bereiche, Sensorentwicklung, Seismologie, Geodäsie und Quantenoptik abgedeckt.

Zusammen mit diesen Kooperationspartnern sind folgende Teilaspekte des Ringlaserprojekts abgedeckt worden:

- Verbesserungen der Sensorstabilität des G Ringlasers in Wettzell.
- Entwicklung des großen Ringlasers GEOsensor für Anwendungen in der Seismologie. Dieses Instrument wird am Piñon Flat Observatorium in Südkalifornien (USA) betrieben.
- Anwendungen der Sagnac-Sensorik auf Strukturanalysen im Bauwesen.
- Entwicklung, Aufbau und Untersuchung des großen Faserkreisels G-FORS im Labor des G-Ringlasers. Mit dieser Apparatur wird das Potenzial der passiven Sagnac-Interferometer im Vergleich zu den aktiven Sagnac-Interferometern untersucht.

Anwendungen der Sagnac-Interferometrie für die absolute Neigungsmessung (Advanced VIRGO, Advanced LIGO). Dies ist wichtig, da herkömmliche Neigungsmesser in den erforderlichen Messzeitintervallen auch auf Horizontalbeschleunigungen empfindlich sind.

Insbesondere der Arbeitsgruppe in Neuseeland kommt in dieser Zusammenarbeit eine große Bedeutung zu. In dem Cashmere Höhlenlabor werden gemeinschaftlich mehrere sehr unterschiedliche große Ringlaser entwickelt und betrieben. Mit dem C-II steht eine monolithische Konstruktion zur Verfügung. Zwei weitere Ringe sind Edelstahlkonstruktionen, eine davon hat einen extrem großen Skalenfaktor ($350 - 830 \text{ m}^2$), die andere ist vertikal aufgestellt. Ein weiterer Ring entspricht der GEOsensor-Konstruktion. Das Cashmere Labor bietet eine einmalige Forschungsumgebung, um neue Techniken und Verfahren zu entwickeln und zu erproben, welche dann auf den G Ringlaser übertragen werden können. In den vergangenen 5 Jahren wurde von dieser Möglichkeit umfassend Gebrauch gemacht. Auf diese Weise konnte die Empfindlichkeit und Stabili-

tät des Sensors auf den heutigen Stand (siehe Abbildung 2.8) geführt werden. Aktuelle Vorhaben werden nachstehend weiter ausgeführt.

2.7.2 Integration der Ringlaserbeobachtungen in die Analyse vom VLBI

Im Rahmen der Forschergruppe „Erdrotation“ wurden in der ersten Förderungsphase 2005 – 2008 Ringlasermessungen in die VLBI-Auswertungen integriert (Mendes et al., 2009). Dieser Prozess zur Integration der Ringlasermessungen in die C04-Zeitreihe verspricht insbesondere im Kurzzeitbereich Verbesserungen der Erdrotationsserien und soll weiter ausgebaut werden. Es ist wünschenswert mittelfristig weitere große Ringlaser in diesen Prozess einzugliedern (siehe auch Abschnitt 2.7.4).

2.7.3 Injection Locking großer Ringlaser

Die Ringlaser des Verbunds BKG, FESG und UC (University of Canterbury, NZ) erreichen die Quantenrauschgrenze bislang noch nicht. Der G Ringlaser ist dabei der stabilste Rotationssensor mit einem Auflösungsvermögen von 1 pico-rad/s (bei einer Integrationszeit von ca. 5000 Sekunden). Abbildung 2.8 verdeutlicht den erreichten Status des Geräts im Vergleich.

Es besteht eine große Wahrscheinlichkeit, dass bei den durch die Spiegeleigenschaften vorgegebenen Arbeitsbedingungen Phasenrauschen des Laserprozesses die Hauptursache darstellt. Dieser Phasenrauschanteil wird durch den für den Monomodenbetrieb notwendigen Arbeitspunkt in der Nähe der Laserschwelle maßgeblich verursacht und ist eine Konsequenz der Modenselektion durch differenzielles Pumpen (Gain-Starvation). Ein möglicher Ausweg zur Reduktion des Phasenrauschens großer Ringlaser kann durch die Anwendung von „Injection Locking“ (Siegman, 1986) erreicht werden. Bei diesem Verfahren wird das geringe Phasenrauschen eines geregelten externen Monomodenlasers auf den internen Oszillator übertragen ohne dessen Empfindlichkeit für Rotationsmessungen (Strahlengang) zu beeinträchtigen. Die Hauptaufgabe besteht darin, die Phasensynchronisation zwischen externen und internen Resonator z.B. nach der Methode von Tang und Statz (1967) unter

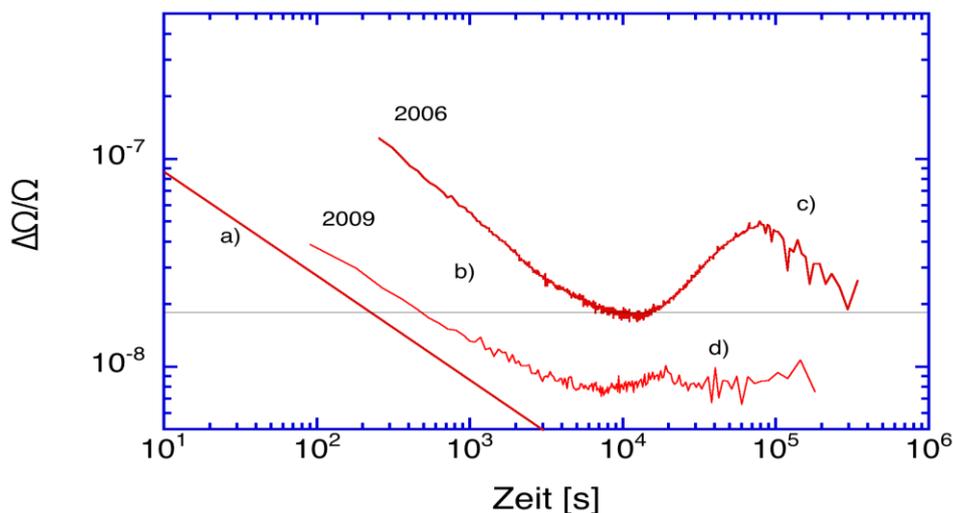


Abbildung 2.8: Auflösungsvermögen des G Ringlasers in Abhängigkeit der Integrationszeit. Die Linie a) zeigt die durch den Schrotrauschanteil bestimmte theoretische Grenze, während b) das erreichte Auflösungsvermögen zeigt. Der Anstieg c) ist durch die Wechselwirkung des Interferometers mit meteorologischen Einflüssen verursacht, welche sich durch die Druckkabine verringern lassen d). Die horizontale Linie zeigt eine Drehrate von 1 pico-rad/s an.

geeigneter Berücksichtigung der Besonderheit unser Ringlaser (geringer Toleranzbereich aufgrund der hohen Güte) herzustellen. Die Durchführbarkeit dieses Verfahrens (Walls, 1983, Bondurant und Shapiro, 1984, Gea-Banacloche, 1987, Marte et al., 1988, Leuchs, 1988, Rice et al, 1994, Henry und Kazarinov 1996) für die Sagnac-Interferometrie soll am C-II Ringlaser entwickelt und erprobt werden, um die Einsatzfähigkeit des G Ringlasers in der Experimentierphase nicht zu beeinträchtigen.

2.7.4 Ringlaser Signalkorrelation

Große Ringlaser mit einer theoretischen Schrotrauschgrenze von $9 \cdot 10^{-11}$ rad/s/sqrt(Hz) lösen heute externe Drehraten von bis ca. $3 \cdot 10^{-7}$ μ rad/s verlässlich auf. Dies entspricht bei Integrationszeiten von 1800 s (0,5 Stunden) einem relativen Auflösungsvermögen $\Delta\Omega/\Omega$ von etwa $7 \cdot 10^{-9}$. Da sich jedoch nicht nur Variationen der globalen Erddrehrate in den Zeitreihen der Sagnacfrequenz widerspiegeln, sondern auch lokale Rotationsanteile, mikroseismische Erschütterungen (Rotationsanteil) und apparative Artefakte, besteht grundsätzlich das Problem, die einzelnen Ursachen von Störsignalen von den Beiträgen der Erddrehrate zu separieren. Diese Problematik ist in ähnlicher Form schon in den Gravitationswellenantennen GEO600, VIRGO und LIGO aufgetreten. Hieraus wurde eine Technik entwickelt, welche durch Korrelation der Zeitreihen der einzelnen parallel beobachtenden Observatorien globale Signale von lokalen Einflüssen separieren kann. Da es sich bei Ringlasern und Gravitationswellenantennen in beiden Fällen um große optische Interferometer handelt, lassen sich diese Techniken von einem Instrumententyp auch auf den anderen übertragen. Aus diesem Grunde soll der UG Ringlaser in Christchurch durch eine aktive Stabilisierungsstufe so ausgebaut werden, dass seine mechanische Stabilität ausreichend verbessert werden kann, um diese Korrelationstechniken im Bereich Ringlaser nutzbar zu machen. Die erforderlichen Schlüsseltechnologien werden aktuell (2009) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Quantenoptik in Hannover im Rahmen des QUEST-Programms, sowie der University of Canterbury im Rahmen unseres Kooperationsabkommen entwickelt. Da der G Ringlaser und der UG Ringlaser an entgegengesetzten Seiten der Erde aufgestellt wurden, sind lokale Rotationsanteile und auch mikroseismische Signale ausreichend unabhängig, um sicher von den Signaturen des globalen Erdrotationssignals getrennt zu werden. In den vergangenen 2 Jahren hat die Ringlasergruppe durch die Kooperation mit der Universität Pisa und dem INFN den Aufbau eines Ringlasers (GEOsensor Design) für den Einsatz bei dem Gravitationswellenexperiment VIRGO ermöglicht (Lantz et al, 2009, Belfi et al, 2009). Im Rahmen eines Grundlagenphysikexperimentes gibt es bereits erste Planungen für einen großen Ringlaser im Gran Sasso Massiv.

2.7.5 Alternative Rotationssensorkonzepte

An der Universität Tübingen und an der University of California, Berkeley werden alternative Rotationssensorkonzepte basierend auf der Erzeugung von Sagnac-Phasenverschiebungen in Josephson Oszillationen in superfluiden Heliumströmungen verfolgt. Insbesondere die Arbeiten der Gruppe von R. Packard (NSF-Antrag #0902147) befinden sich bereits in einem fortgeschrittenen Stadium. Vergleichsmessungen zwischen einem solchen „Heliumgyroskop“ und dem G Ringlaser im Untergrundlabor des GO Wettzell sollen zur gegebenen Zeit ausgeführt werden, um das Potential dieser alternativen Sensoren zu evaluieren. Theoretisch gesehen sollte wegen der viel kleineren Wellenlänge ein erheblicher Zuwachs im Auflösungsvermögen von mehreren Größenordnungen gegenüber einem optischen System möglich sein. Allerdings erreichen diese Systeme vorläufig bei weitem noch nicht das Auflösungsvermögen optischer Sagnac-Interferometer. Obendrein muss bei diesen viel kleineren Sensoren auch sichergestellt werden, dass zeitvariable systematische Fehler mit ausreichender Genauigkeit kontrolliert werden können. Die Kontrolle der Ori-

entierung dieser Sensoren auf dem Erdkörper stellt ein weiteres Problemfeld dar.

Im Rahmen des EuroQUASAR Programms wurde an der Leibniz-Universität Hannover das Projekt: „*Exploring the potential of Atomic Quantum Sensors for observation of Earth Rotation and mass variations*“ begonnen. Als assoziierter Partner nimmt das Ringlaser-Projekt des GO Wettzell an der Bewertung der Atominterferometer mit teil. Auch in diesem Falle sind Vergleichsmessungen im Ringlaserlabor in Wettzell vorgesehen, um nach Auswertung der Fehlerbeiträge und der Sensorempfindlichkeit das Potential dieser Technik zu evaluieren.

2.7.6 Zielstellungen Ringlaser

Mit den in den letzten Jahren erfolgten Verbesserungen am Großringlaser liefert das Gerät permanent Daten von ausgezeichneter Qualität was Rauschen und Stabilität betrifft. Sehr nützlich war für Testmessungen der neuen Spiegel der Zugang zu den Ringlasern am Department of Physics and Astronomy der University of Canterbury (Neuseeland), eine Zusammenarbeit, welche weitergeführt werden soll. Zusammen mit der University of Canterbury soll das Injection Locking großer Ringlaser zur Verbesserung der Phasenstabilität erprobt werden.

Die Ringlaserbeobachtungen sollen zusammen mit VLBI-Messungen kombiniert analysiert und im Rahmen des IERS genutzt werden. Weitergeführt werden sollen die Untersuchungen betreffend lokaler Einflüsse auf die Ringlasersignale. Zur Trennung von lokalen und globalen Signalen sollen Daten mehrerer Ringlaser korreliert werden. Hierzu soll der UG Ringlasers in Christchurch durch eine aktive Stabilisierungsstufe ergänzt werden. Zusammen mit dem Scripps Institution of Oceanography, La Jolla (USA) und dem Department of Earth Sciences – Geophysics der LMU München soll der GEOSensor weiterbetrieben und für die junge Disziplin der Rotationsseismik genutzt werden. Inertialsensoren, welche auf alternativen Konzepten wie suprafluidem Helium (Universität Tübingen) und Atominterferometern (EuroQUASAR Programm der Leibniz-Universität Hannover) beruhen, sollen mit dem Großringlaser in Wettzell verglichen werden, sobald sie verfügbar sind.

2.8 Messung lokaler Effekte

Jedes Messsystem unterliegt mehr oder weniger stark lokalen Einflüssen wie Bodendeformationen, Temperatur-, Feuchte und Luftdruckschwankungen oder lokalen Massenvariationen. Deshalb werden an den Observatorien der FGS neben den Messsystemen der geodätischen Raumverfahren auch eine ganze Reihe von Messinstrumenten eingesetzt, um lokale Effekte aufzuzeichnen. Hierzu gehören Neigungsmesser, Seismometer, hydrologische und meteorologische Instrumente sowie die Vermessung der Referenzpunkte und des lokalen Fixpunktnetzes.

2.8.1 Neigungsmessungen

Die Überwachung der Orientierung durch Neigungsmesser spielt insbesondere beim Großringlaser „G“ eine wichtige Rolle. Dort wird mit derzeit sieben hochauflösenden Plattform-Neigungsmessern permanent die Orientierung des Instruments gemessen und aufgezeichnet, wobei eine Winkeländerung von 1 Mikrorad bezüglich der Erdrotationsachse das Ringlasersignal um 10^{-6} beeinträchtigt. Diese hohe Sensitivität stellt hohe Anforderungen an die Güte der Neigungsmesser, der Kalibration und des Korrekturverfahrens. Bevor die Neigungszeitreihen in das Ringlaser-Korrekturmodell einfließen, müssen sie bezüglich der zeitlichen Variation der Lotrichtung korrigiert werden. Neben der Gezeitenattraktion, die bereits routinemäßig korrigiert wird, wird derzeit ein Verfahren entwickelt, um auch atmosphärische Attraktionsanteile aus den Zeitreihen der Neigungsmesser zu eliminieren.

Daneben sind in Wettzell zwei Bohrlochneigungsmesser in 6 und 30 m Tiefe installiert, um regionale Neigungen z.B. aufgrund atmosphärischer Auflast von ganz lokalen Effekten, die durch Inhomogenitäten verursacht werden (Geologie-, Topographie- und Cavity-Effekte), unterscheiden zu können. Insbesondere die Zeitreihen des in 30 m Tiefe installierten Askania-Pendels können zur Validierung von lokalen Deformationsmodellen herangezogen werden, wie sie derzeit im Rahmen der Analyse von Ringlaserzeitreihen berechnet werden (s.a. Abschnitt 2.7.1).

Ein weiterer Neigungsmesser ist in Pfeiler Nr. 21 installiert, um Verkippungen eines typischen Vermessungspfeilers beispielhaft zu dokumentieren. Gleichzeitig ist der Pfeiler mit einer GNSS-Antenne versehen und auch in das lokale Vermessungsnetz integriert. Die mittlerweile über 10 Jahre lange Zeitreihe zeigt außer einem saisonalen Signal von max. 50 Mikrorad und einem einmaligen Ereignis von etwa 100 Mikrorad im Sommer 2003 keine nennenswerten Verkippungen. Als horizontale Verschiebungen ausgedrückt liegen die Werte unter der Auflösungsgrenze der örtlichen Vermessung.

2.8.2 Hydrologische Messungen

In den Zeitreihen der lokalen Sensoren wie dem supraleitenden Gravimeter, den Neigungsmessern oder auch dem Großringlaser bilden sich immer wieder hydrologische Ereignisse wie Regenfälle oder Schneeschmelzen ab. Ein einfacher Zusammenhang zwischen den beobachteten hydrologischen Signalen und dem Grundwasserspiegel oder der Bodenfeuchte besteht in der Regel jedoch nicht. Durch den im Zuge der GRACE Satellitenmission sehr deutlich gewordenen Einfluss hydrologischer Massenvariationen auf Schweremessungen wird im Rahmen eines Pilotprojektes der Sektion Ingenieurhydrologie des GFZ Potsdam beispielhaft versucht, im Bereich des Geodätischen Observatoriums Wettzell die lokalen hydrologischen Massenvariationen quantitativ zu erfassen und daraus entsprechende Schwereänderungen am Ort des Gravimeters herzuleiten. Einerseits dient das der Validierung der hydrologischen Modelle, andererseits können damit unerwünschte Signalanteile aus den Gravimeterreihen separiert werden. In Zusammenhang mit Satellitenmissionen ist hierbei vor allem auch die Abschätzung von lokalen und regionalen hydrologischen Anteilen interessant. Aber auch für die Orientierungskorrektur des Großringlasers ist eine Quantifizierung des hydrologischen Attraktionsanteils in den Zeitreihen der Neigungsmesser von Interesse.

Hierzu wurden in den Jahren 2007 und 2008 zusätzlich zu den bestehenden drei Pegeln sieben weitere Grundwasserpegel auf der Station bzw. in deren Umgebung errichtet und mit Messeinrichtungen zur Erfassung von Grundwasserhöhe, -temperatur und -leitfähigkeit versehen. Darüber hinaus wurde eine Vielzahl von TDR-Sonden zur dreidimensionalen Erfassung der Bodenfeuchte oberflächennah und in verschiedenen Tiefen eingebaut, mehrere Niederschlagsmesseinrichtungen, ein Schneehöhensensor sowie ein Überfallwehr für die Abflussmessung in der Umgebung der Station installiert (Abbildung 2.9). Daneben wurde durch die Analyse zahlreicher Boden- und Gesteinsproben, durch Feldversuche und geoelektrische Tiefensondierungen ein detailliertes Bild der Beschaffenheit, der hydraulischen Leitfähigkeit und der Speicherkapazität des Untergrundes erstellt. In diesem Zusammenhang einmalig ist die Installation eines Lysimeters, das einen ungestörten Bodenmonolith mit 1,5 cbm Volumen kontinuierlich wiegt (Abbildung 2.10). Damit ist es möglich, den gefallenen Niederschlag, das austretende Sickerwasser und die verdunstete Wassermenge exakt zu quantifizieren, was für die hydrologische Bilanzierung von großem Wert ist.

Das aus diesen Daten abgeleitete hydrologische Modell gibt zu jedem Zeitschritt die Verteilung des Wassers im Untergrund wieder. Sensitivi-

tätsanalysen zeigen, dass in einem Radius von 50 m um das Gravimeter 2/3 des hydrologischen Signals erzeugt werden und die Topographie einen großen Einfluss hat. Die Gegenüberstellung zeigt, dass bereits ein wesentlicher Teil der Schwereänderungen in den Gravimeterresiduen durch das hydrologische Modell wiedergegeben werden (Abbildung 2.11).

Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde im Bereich des neuen Gravimetergebäudes in Wettzell bereits ein entsprechendes hydrologisches Monitoringsystem dauerhaft installiert (Cluster 5 in Abbildung 2.9). Es ist geplant, nach einer Validierungsphase die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung in die Korrektur der Gravimeterzeitreihen einfließen zu lassen.



Abbildung 2.9: Installierte Hydrologische Sensoren und Vermessungsnetz auf dem Geodätischen Observatorium Wettzell



Abbildung 2.10: Einbau eines Lysimeters im Juli 2008

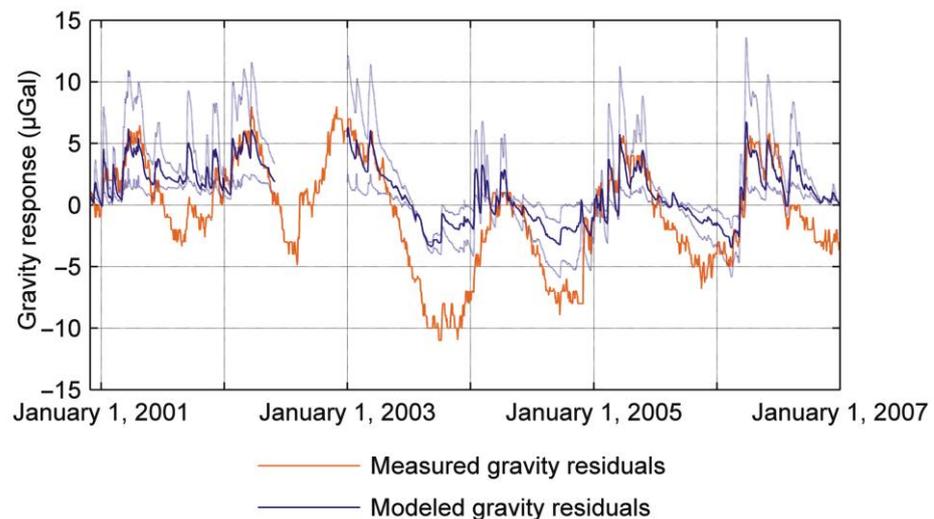


Abbildung 2.11: Modellierter hydrologischer Schwereeffekt in Gegenüberstellung mit den Residuen des supraleitenden Gravimeters (rot)

2.8.3 Meteorologische Messungen

Zur Berechnung der Refraktionskorrekturen für die Laserentfernungsmessungen sowie für die VLBI- und GPS-Beobachtungen werden meteorologische Parameter benötigt. Hierfür sind meteorologische Stationen in Wetzell, in Concepción und in O'Higgins installiert, die kontinuierlich Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlag aufzeichnen. In regelmäßigen Abständen werden die Wetterdaten durch Vergleichsmessungen mit Aspirations- Psychrometern und Absolutbarometern überprüft.

Im Zuge einer Weiterentwicklung der meteorologischen Messstation wurden verschiedene, heute gängige Möglichkeiten zur Datenerfassung untersucht. Zur Vereinheitlichung und zur Verringerung von zeitaufwendigen Hardwareentwicklungen wird eine eigenentwickelte, LINUX-basierte Lösung erprobt. Das Programm erfasst zeitgesteuert die Messwerte der angeschlossenen Sensoren und erzeugt RINEX-konforme Datenausgaben, so dass diese Lösung auch für permanente GPS-Stationen eingesetzt werden kann. Zurzeit laufen hierzu Langzeitfunktionstests mit entsprechenden Kalibrierungsmessungen.

In Concepción wurde in Zusammenarbeit mit den Meteorologen der Universidad de Concepción ein neuer Wettermast für Messungen in 10 m Höhe aufgebaut. Er befindet sich zurzeit im Probetrieb. Er soll als Referenzstation in den chilenischen Wetterdienst einbezogen werden.

Zusätzlich werden Wasserdampfradiometer eingesetzt, um den Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre zu bestimmen. Aus diesen Messwerten kann der sog. ‚wet-path-delay‘, d.h. die Verzögerung der Laufzeit wegen der Feuchtigkeit in der Atmosphäre, ermittelt werden (Abbildung 2.12). In Wettzell werden seit über 10 Jahren kontinuierlich Radiometerdaten aufgezeichnet.

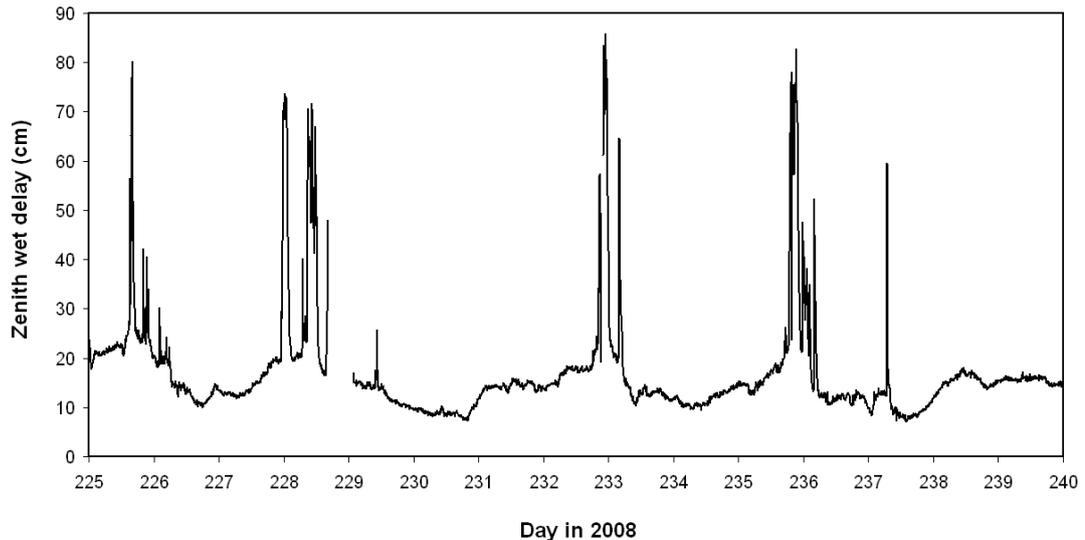


Abbildung 2.12: Messreihe des Wasserdampfradiometers Wettzell während des VLBI-Experiments CONT08. Werte oberhalb etwa 25 cm sind durch Regen beeinflusst.

Eine weitere Möglichkeit, den Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre zu bestimmen, wird derzeit in Concepción erprobt. Mit einem sogenannten Absorption Line Analysing Spectrometer (ALIAS), einer Entwicklung der ETH Zürich, soll durch Analyse hochaufgelöster H₂O-Absorptionsspektren von direktem Sonnenlicht der integrale Wasserdampfgehalt der Troposphäre gemessen werden. Ziel ist dabei die Refraktionskorrektur satellitengeodätischer Messungen, hauptsächlich im Mikrowellenbereich (GNSS, VLBI). Jüngste Ergebnisse haben gezeigt, dass das ALIAS auch zur Vermessung der spektralen Umgebung der Atmosphäre im Bereich der Laserlinie, auf der das SLR-System sendet, zur Untersuchung von Refraktionseinflüssen genutzt werden kann. Nach Beseitigung technischer Probleme soll das Spektrometer den Testbetrieb wieder aufnehmen.

2.8.4 Seismologische Aufzeichnungen

Die seismologische Station Wettzell (WET) ist mit einem Breitbandseismometer STS-2 ausgestattet und wird von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe betrieben. Sie ist Teil des deutschen seismologischen Regionalnetzes (GRSN). Durch den Einsatz robuster und erprobter Technologie wie z.B. einem Reftek Datenerfassungssystem, einer Anbindung über Glasfaserkabel an das Internet mit Fernwartung und einer Zeitsynchronisation mit GPS ist ein weitgehend autonomer und störungsfreier Betrieb gewährleistet.

Ein zweites Seismometer befindet sich auf dem G-Ringlaser und wird zusammen mit den Signalen des Ringlasers und zweier Neigungsmesser mit einer Rate von 20 Hz aufgezeichnet, um die vom Ringlaser gemessene Rotationskomponente seismischer Wellen mit den rein

translatorischen Bewegungen in Beziehung setzen zu können. Die Analysen werden vom Institut für Geophysik der LMU München im Rahmen der International Working Group on Rotational Seismology durchgeführt.

Am Observatorium TIGO in Concepción wird ein Guralp-Seismometer betrieben, das in ein Regionalnetz eingebunden ist, welches vom Seismologischen Institut der Universidad de Concepción unterhalten wird.

2.8.5 Lokale Vermessung

Lokales Vermessungsnetz

Das lokale Vermessungsnetz dient zum einen dem Nachweis der lokalen Stabilität der Referenzpunkte der geodätischen Raumverfahren, zum anderen liefert es die Verbindungsvektoren zwischen den einzelnen Messsystemen, die eine Kombination der verschiedenen Raumverfahren erst ermöglichen.

Am Observatorium Wettzell hat das Netz eine Ausdehnung von 300 x 150 m und besteht aus rund 50 Pfeiler- und Bodenpunkten. Es finden von Zeit zu Zeit Wiederholungsmessungen statt, wobei abgesehen von wenigen instabilen Pfeilern bislang keine signifikanten Bewegungen festgestellt wurden. Die Standardabweichungen nach der Netzausgleichung liegen immer unter 0,5 mm, im Mittel betragen sie 0,13 mm.

Das Vermessungsnetz von TIGO besteht aus 4 Pfeilern, 7 Bodenpunkten und 3 Höhenbolzen sowie den Achsenschnittpunkten des VLBI- und SLR-Teleskops und wurde im Jahr 2003 präzise vermessen. Nach der Netzausgleichung sind alle Standardabweichungen kleiner als 0,3 mm und liegen im Mittel bei 0,13 mm.

Das Netz der Station O'Higgins besteht aus 6 Pfeilern, wovon zwei als GNSS Permanentstationen (OHI2 und OHI3) genutzt werden, 1 Bodenpunkt und 2 Zwischenpunkte. Die letzte Vermessung aus dem Jahr 2006 ergab eine mittlere Standardabweichung von 0,6 mm.

Mit Hilfe von GPS-Messungen auf ausgewählten Pfeilern wurden die Punkte der Vermessungsnetze, die in lokalen Koordinatensystemen vorliegen, in das geozentrische kartesische Koordinatensystem überführt, so dass auch die Referenzpunkte der Messsysteme der geodätischen Raumverfahren in einem global einheitlichen Referenzsystem für Kombinationslösungen zur Verfügung stehen.

Footprint-Netz

Mit dem sogenannten Footprint-Netz wird die weiträumigere Umgebung der Station beobachtet um sicherzustellen, dass die mit den Raumverfahren gemessenen Koordinatenveränderungen repräsentativ für die gesamte Region sind. In dem Bereich um das Observatorium Wettzell kommen fünf permanente GNSS-Stationen zum Einsatz, die eine Region von etwa 15 x 25 km abdecken. Nachdem sich gezeigt hatte, dass die Station ARBR (Arber) aufgrund örtlicher Gegebenheiten schlechte Ergebnisse lieferte, wurde 2008 die Station ARNB (Arnbruck) neu errichtet. Mittlerweile sind auch die Punkte des früheren Footprint-Netzes mit GPS eingemessen und in ein globales Referenzsystem eingebunden.

Es werden routinemäßig Tageslösungen berechnet, die formale Fehler von 1-2 mm in der Lage und 3-6 mm in der Höhe aufweisen. In den mittlerweile bis zu 8 Jahre langen Zeitreihen sind vor allem in der Horizontalkomponente saisonale Systematiken erkennbar, die vermutlich mit thermoelastischen Verformungen des Monuments oder Gebäudes zusammenhängen. Im Langzeitverhalten wird die geologische Stabilität der gesamten Region dokumentiert (Abbildung 2.13).

Das Footprint-Netz in Concepción besteht aus 4 permanenten GNSS-Stationen, die in einer Entfernung von 20-70 km um das Observatorium

TIGO eingerichtet wurden. Die Station Dichato ist gleichzeitig mit einer Messeinrichtung für die Meereshöhe versehen.

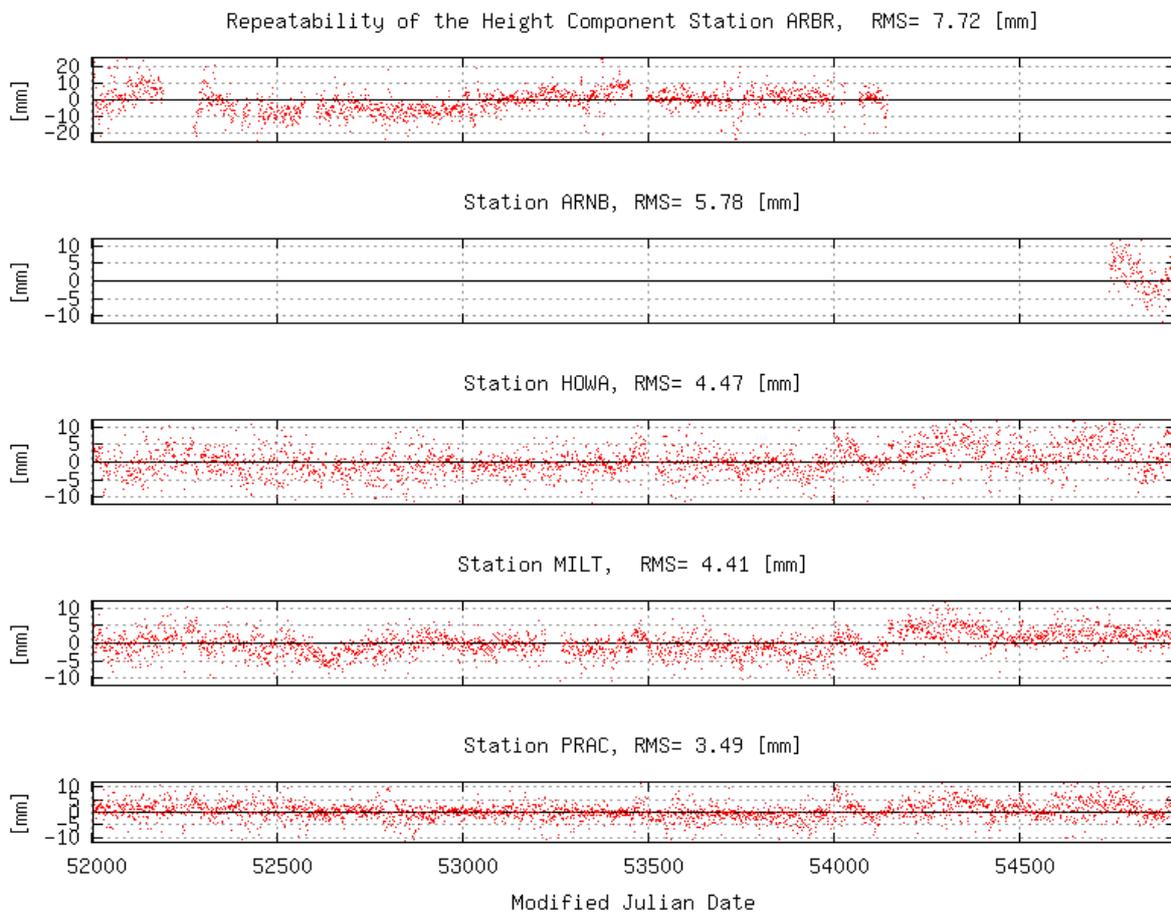


Abbildung 2.13: Höhenkomponente der 5 Footprint-Stationen, bezogen auf WTZR

2.8.6 Zielstellungen

Die lokalen Messungen liefern wichtige ergänzende Informationen, um die Ergebnisse der geodätischen Raumverfahren richtig zu interpretieren, Störeinflüsse aufzudecken und ggf. zu korrigieren.

In Wettzell ist das Vermessungsnetz im Bereich der neu errichteten Twin-Teleskope zu erweitern, die neuen Punkte in das Netz zu integrieren und die Referenzpunkte der neuen Teleskope sobald wie möglich ein zu messen. Außerdem soll überprüft werden, ob ein quasi-kontinuierliches Monitoring von Referenzpunkten der Radioteleskope praktikabel ist. Ein entsprechender Beobachtungspfeiler auf dem Dach des Betriebsgebäudes, der sich auf gleicher Höhe mit den Elevationskabinen der TWIN Teleskope befindet, wird hierfür eingerichtet.

Die GNSS-Stationen der Footprint-Netze werden wie bisher weiter betrieben, wobei für Wettzell eine Einbeziehung benachbarter SAPOS-Stationen in das Footprint-Netz angedacht ist. Damit ergibt sich die Möglichkeit, ohne zusätzlichen Aufwand das Netz zu erweitern, auch in andere tektonische Einheiten wie z.B. dem süddeutschen Molassebecken.

Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Sektion Ingenieurhydrologie des GFZ Potsdam wird dabei weitergeführt. Diese Erkenntnisse über lokale Einflüsse auf das Schweresignal werden in Zukunft die Kombination terrestrischer Schweremessungen mit denen der Satellitenmissionen vereinfachen oder erst ermöglichen.

2.9 Automatisierung Systemsteuerung

Ein Geodätisches Observatorium benötigt als Teil seiner Infrastruktur eine funktionsfähige, robuste Informationstechnik (IT), um seine Aufgaben erfüllen zu können. Die Anforderungen an die IT ergeben sich aus dem Betrieb der Messinstrumente, welche kontinuierlich das gesamte Jahr über Daten aufzeichnen. Um die Messwerte der Epoche zuzuordnen, werden die Rechneruhren über das Netzwerk synchronisiert und diese arbeiten hardwarenah unter Echtzeitbedingungen. Diese Anforderungen der Messsysteme müssen in eine geeignete IT-Architektur übersetzt werden. Die gewählte Architektur setzt sich zusammen aus einem typischen Rechenzentrum und dedizierten speziellen IT Komponenten, welche die Messverfahren vor Ort unterstützen und ausbilden. Um Zusammenschaltungen von IT Komponenten, die unter Echtzeitbedingungen miteinander kommunizieren, zu unterstützen, wird eine „Enklavenbildung“ gewählt, welche die für das Gesamtsystem benötigten Teile in eigenen IT Netzen zusammenfasst und somit weitgehend von äußeren Netzeinflüssen abschottet. Die Aufgaben und Dienste, die von verschiedenen Messsystemen benötigt werden und die der Auswertung und Analyse dienen, werden zentral bereitgestellt.

Die Anbindung an das Internet ist eine weitere zentrale Aufgabe der IT für das Geodätische Observatorium. Die meisten Messsysteme benötigen für ihre Messaufgaben Informationen von dritter Seite oder liefern ihre Ergebnisse oder Messdaten an Daten- und Auswertezentren bzw. übermitteln in Echtzeit ihre Daten. Damit ist ein zuverlässiger Zugang zum Internet mit dem benötigten Durchsatz von essentieller Bedeutung. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch auch die Sicherheit gegenüber Angriffen über die Netzwerke. Da die Anforderung an Sicherheit und die nach Durchsatz miteinander konkurrieren, sind Lösungen zu realisieren, die beiden Anforderungen gerecht werden.

Durch die extrem schnell fortschreitende technische Entwicklung auf diesem Sektor und die sich dynamisch ändernden Anforderungen der Messsysteme entwickelt sich die Laufendhaltung und Betreuung der Informationstechnik zu einer permanenten Aufgabe.

Die Integration der Einzelaufgaben in ein Gesamtsystem wird in Zukunft in eine eigentliche Stationssteuerung münden. Ziel ist, gleichartige Aufgaben messsystemübergreifend zu konzipieren. Parallel dazu werden Routineaufgaben automatisiert. Grundlegend hierzu ist eine abgesicherte Steuerung der Systeme, welche einerseits ein umfassendes Systemmonitoring beinhaltet und andererseits alle möglichen Ausnahmesituationen beherrschen. Die gegenwärtigen Entwicklungen werden auch eine sichere Fernsteuerung der Systeme zulassen. Damit ist letztlich auch ein stationsübergreifendes Steuersystem z.B. für die Stationen Wettzell, TIGO und O'Higgins vorstellbar.

2.9.1 Stand der Arbeiten

Die Informationstechnik des Geodätischen Observatoriums Wettzell unterstützt die verschiedenen Messsysteme und die allgemeinen Tätigkeiten der Mitarbeiter und stellt hierfür die entsprechende Infrastruktur zur Verfügung.

Auf der Basis der erstellten Dissertation „Verbesserung des Datenmanagements in inhomogenen Rechnernetzen geodätischer Messeinrichtungen auf der Basis von Middleware und Dateisystemen am Beispiel der Fundamentalstation Wettzell“ (Neidhardt, 2005), welche ein Konzept beschreibt, die heterogenen Voraussetzungen in Bezug auf den Datenaustausch und der Datendarstellung zu vereinheitlichen, wurde Teile der echtzeitbasierten Messsysteme SLR und VLBI modifiziert. Diese Anstrengungen führten zu ersten Umsetzungen von autarken, aber gekoppelten Systemen, welche unabhängig zueinander entwickelt und getestet

werden können. Sie tragen aber trotzdem den echtzeitnahen Bedingungen und der Tatsache Rechnung, dass sie auf einem Rechner oder über Internet verbundene Systeme realisiert werden können. Eine robuste Kommunikationsschicht wurde auf der Basis von „Remote Procedure Calls“ RPC aufgebaut. Die Beschreibung der Schnittstellen der Systeme wird unter Einbeziehung der Kommunikationsschicht mit Hilfe einer Interface Beschreibungssprache realisiert, welche ein Gerüst für die Programmierung der systemeigenen Dienste bereitstellt. Dieses System wurde erfolgreich im SOS-W realisiert und findet auf internationaler Ebene Einzug in das NASA Field System der VLBI Messdatenerfassung. Dort wird seine Stärke u.a. dazu genutzt, eine Steuerung der VLBI Messdatenerfassung von entfernter Stelle aus zu implementieren.

Viele Anwendungen des Geodätischen Observatoriums Wettzell sind spezifisch für die Anforderungen der Messstationen. Deshalb ist es notwendig, einen Großteil der Programme spezifisch für die Anforderungen zu entwickeln. Die zugrunde liegenden Anwendungen sind für einen sehr langen Zeitraum (10 bis 20 Jahre) ausgelegt, in denen sich die Randbedingungen, wie z.B. Rechnersysteme, Betriebssysteme, Anforderungen, Hersteller usw., ändern können und auch davon ausgegangen werden muss, dass Entwickler und Programmierer wechseln. Aus diesem Grund ist eine grundlegende Vorgehensweise und Organisation zu schaffen, die eine möglichst hohe Unabhängigkeit der Dokumentation und der Quellprogramme von wechselnden Randbedingungen garantiert. Es wurden deshalb Entwicklungsrichtlinien definiert, die vom Modell bis zur Programmierung eine durchgängige Dokumentation der Programme erlauben. Unter anderem werden hierfür Teile der „Unified Modelling Language“ (UML) genutzt. Als weitere Vorgaben wurde für zukünftige Eigenentwicklungen festgelegt, dass diese unter dem Betriebssystem DEBIAN Linux stattfinden und die Programmiersprachen C++ bzw. C als Compiler- und Perl als Interpreter-Sprache nutzen sollten. Begleitet wird diese Vorgehensweise durch eine Normierung des Programmierstils, welche in Wettzell in den „Design Rules für die strukturierte Programmierung unter C und die objektorientierte Programmierung unter C++“ zusammengefasst ist. Diese Vorgehensweise der Vereinheitlichung befindet sich im Aufbau und wird den Erfordernissen iterativ angepasst. Es soll versucht werden, einen Synergie-Effekt im Wissensstand der Mitarbeiter von Wettzell zu erreichen und Doppelarbeit im Entwicklungsaufwand zu vermeiden. Insbesondere soll die Nutzung und Wiederverwendbarkeit einmal geschriebener Software auch in Zukunft sichergestellt werden.

Ein Ziel des Forschungsprogramms von 2005 – 2010 war ein Datenerfassungssystem für System- und Umweltparameter. Ein flexibles und allgemeingültiges System wurde für SOS-W entwickelt, welches dort zur Systemüberwachung eingesetzt wird und als Sicherheitssystem erweitert wurde. Auf der Basis der robusten Kommunikationsschicht und des daraus abgeleiteten Entwurfsmusters wurde ein Datenerfassungssystem realisiert, welches es erlaubt, eine beliebige Anzahl von Parametern über diverse, externe Schnittstellen einzulesen und anderen Realisierungsschichten zur Ausarbeitung bereit zu stellen. Integriert wurde ein hardwarebezogenes Sicherheitskonzept, um Notsysteme ohne Software realisieren zu können. Als praktischer Anwendungsfall kann hier wiederum das SOS-W genannt werden, in dem eine Reihe von Systemparametern aufgezeichnet werden, um in kritischen Situationen adäquat reagieren zu können. Das hardwarenahe Sicherheitssystem wird für den Personenschutz ausgelegt.

2.9.2 Aktualisierung der IT Komponenten und LAN Struktur der Station Wettzell

Auf der Basis der vorhandenen Architekturen und der zu erfüllenden Aufgaben der Informationstechnik und unter der Tatsache, dass neue Ansätze der IT und neue Messsysteme mit geänderten Anforderungen an das

Geodätische Observatorium herangetragen werden, ist eine fortwährende Aktualisierung der IT Komponenten und der LAN Struktur der Station Wettzell nötig.

Zum einen wird das SOS-W System als semiautomatisches SLR System in den Produktionsbetrieb gehen und zum zweiten wird Twin den Produktivbetrieb aufnehmen. SOS-W stellt aus Sicht der IT die Anforderungen, dass es lokal und auch vom WLRS aus ferngesteuert und von dort überwacht werden soll. Weiterhin benötigen beide SLR-Systeme dieselben Datensätze für den Betrieb und nutzen dieselben Vorgehensweisen für Datenauswertung, -analyse, Qualitätskontrolle und zum Datenversand. Durch diese Forderungen ergibt sich eine geeignete Enklavenbildung für die Systeme. Für die VLBI Systeme Twin, RTW gelten ähnliche Überlegungen: Jedes System ist für sich betrachtet eine Enklave und bildet für die Fernsteuerbarkeit und Bereitstellung der Beobachtungsinformationen entsprechende Dienste. Jedoch stellt der Datenversand in Echtzeit über das Internet hohe Anforderungen an die Zugangsgeschwindigkeit zum Internet, was besondere Vorkehrungen zum Schutz gegenüber Angriffen vom Internet stellt.

Im Zuge der Erweiterung der Messsysteme als semiautomatische und von der Ferne überwachte Systeme werden eine Reihe von Datenüberwachungssystemen etabliert werden. Damit wird es zu einer Erweiterung der Rechensysteme und des Datenvolumens kommen. Die Architektur der virtuellen Rechner und eigener Speichernetzwerke geben darauf eine entsprechende Antwort.

2.9.3 Erhöhung der Internet Anschlusskapazität

Das Geodätische Observatorium Wettzell wurde im Jahre 2005 über eine Glasfaserstrecke der Kapazität von 34 MBit/s über das Wissenschaftsnetz der Bundesrepublik Deutschland (WIN) an das Internet angeschlossen. Dieser Anschluss wurde auf 622 MBit/s erhöht und wird nun routinemäßig für die Datenübertragung im Rahmen der INTENSIVES mit e-VLBI zu den Korrelatoren benutzt.

Sobald die Twin Teleskope operationell im Einsatz sind, wird sich die Datenmenge durch die Tatsache, dass nun zwei bis drei Radioteleskope Messungen durchführen und sich die Aufzeichnungsrate erhöhen wird, essentiell vergrößern. Spätestens zu diesem Zeitpunkt ist die Aufrüstung des Internet Anschlusses auf mindestens 1 GBit/s notwendig. Ziel der Anbindung an das Internet muss die Realisierung eines stabilen Anschlusses sein, der parallel zu den restlichen Anwendungen des Observatoriums eine stabile, kontinuierliche Datenübertragung für Echtzeit VLBI Anwendungen von mindestens 256 MBit/s Nutzdaten pro Teleskop erlaubt.

Für eine direkte Datenübertragung ohne Zwischenpufferung, die bereits in der Planung ist, wird auch diese Kapazität nicht mehr ausreichen. Physikalisch möglich ist zurzeit eine Anbindung von aktuell 10 GBit/s (Stand Mai 2009). Zur Durchführung der e-VLBI Experimente, welche in Zukunft eine Nutzdatenkapazität von 1 GBit/s aufweisen kann, wird damit eine Anbindung von mindestens der eineinhalbfachen, geforderten Nutzkapazität benötigt. Dies bedeutet im Rahmen des Wissenschaftsnetzes eine Anbindung mit 2,4 GBit/s. (Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass der Korrelator am Max Planck Institut für Radioastronomie in Bonn eine Anbindung von 10 GBit/s oder höher benötigt, um mehr als drei Stationen in Echtzeit korrelieren zu können.)

2.9.4 Erhöhung der Automatisierung der Messsysteme

Wie in Ansätzen bei den Messsystemen VLBI und SOS-W gezeigt, ist ein rechnerunterstützter Betrieb und eine Fernsteuerbarkeit auch von komplexen Systemen mit der erforderlichen Sicherheit möglich. Es bedarf jedoch weiterer Anstrengungen und Erfahrungen, um diese Verfahren in

Richtung eines semiautomatischen Betriebs weiter zu entwickeln. Die bereits durchgeführten Entwicklungen der standardisierten Kommunikation zwischen autonomen Systemen und der zusätzlichen Überwachung der Grundfunktionen weisen den richtigen Weg. Erste erfolgreiche Tests mit O'Higgins und TIGO zeigen die Funktionsfähigkeit. Doch sind diese Verfahren in Zusammenarbeit auch in den internationalen Diensten weiter zu verfeinern und in der Praxis zu testen. Beträchtliches Interesse an den gegenwärtigen Entwicklungen wurden durch Partner im IVS bereits deutlich gemacht.

2.9.5 Aufbau eines Entwurfsmusters für „Data Acquisition“ Systeme (Pilotprojekt)

Das Geodätische Observatorium hat die Aufgabe Messungen der verschiedensten Anwendungen durchzuführen und die Daten zu speichern. Beispiele dieser Anwendungen sind Askania-Pendel, Hydrologie, Meteorologie, Ringlaser, Strom/Spannungen, Temperaturen an Messgeräten. Da die verschiedenen Nutzer diese Anwendungen jeweils individuell entwerfen und realisieren, sollte ein allgemeines Entwurfsmuster entwickelt werden, wie ein solches System einheitlich zu designen, aufzubauen und zu administrieren ist bzw. in welcher Art die Daten zu speichern und für Analysen zugänglich gemacht werden. Diese Vorgehensweise fördert einen Synergie-Effekt und vermeidet Mehrfacharbeit während der Entwicklung. Als Hauptkomponenten werden in Betracht kommen: Einbindung der Messdaten in den Rechner, Synchronisation der Rechneruhr auf die Epoche von Wettzell, Aufbau einer Konfigurationsdatenbasis, Zugang und (interaktive) Änderung der Konfiguration, Erweiterung der Konfigurationsparameter, Speicherung der Messdaten vor Ort, Speicherung an einer zentralen Stelle, Schnittstelle zur Datenhaltung für Analysen, Datenbereitstellung für Web-Interface.

2.9.6 Zielstellungen Automatisierung Systemsteuerung

Ein zentrales Ziel für die fachspezifische Weiterentwicklung der IT auf dem Geodätischen Observatorium Wettzell ist die Erhöhung der Automatisierung der Messsysteme. Das Konzept zur automatischen Steuerung und abgesicherten Fernsteuerung der Messsysteme sowie der gesamten Station, auch unter Einbezug von O'Higgins wird weiterentwickelt und implementiert. Zur Vereinheitlichung von Organisation, Aufbau und Programmierung von Messdatenerfassungssystemen wird ein Entwurfsmuster für „Data Acquisition“ Systeme aufgebaut. Die Datenhaltung auf der Station Wettzell gemäß ERIS-Standard vereinheitlicht. Für die Erhöhung der Anschlusskapazität an das Internet werden die nötigen technischen Voraussetzungen geschaffen unter Einbezug der nötigen Sicherheitsanforderungen des lokalen Netzes.

2.10 Zusammenfassung der Ziele

Übergeordnete Ziele

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Geodätische Raumverfahren	Optimierung des Beobachtungsbetriebs für die internationalen geodätischen Dienste zum Unterhalt der Referenzsysteme	Weiterführung der Teilnahme an internationalen Beobachtungsprogrammen Automatisierung des Beobachtungsbetriebs
Fundamentalstation	Weiterentwicklung des GO Wettzell als Referenz-Fundamentalstation für andere Stationen im Rahmen von GGOS	Weiterentwicklung der Messsysteme und der Integration in ein Gesamtsystem
Zeit und Frequenz	Erhöhung der Konsistenz der Messsysteme	Bereitstellung einer einheitlichen und stabilen Zeitskala für alle Messsysteme am GO Wettzell
Automatisierung	Steuerung der FGS Fundamentalstationen als ein Großgerät	Weiterentwicklung eines einheitlichen Konzepts zur abgesicherten (Fern-)Steuerung aller Messgeräte

Geodätische VLBI

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
- 20m RTW - Twin RT	Kontinuität der Zeitserien und echtzeitnahe Datenübertragung	Überlappender Betrieb von 20m RTW und Twin RT Einsatz breitbandiger Antennen- und Empfangstechnik und digitaler Empfangstechnik Aufrüstung des schnellen Internetanschlusses Automatisierung, abgesicherte Fernsteuerung Beratung internationaler Partner bei der Entwicklung vergleichbarer Systeme
- 20m RTW - Twin RT	besseres Verständnis von Einflüssen auf den mechanischen und elektrischen Referenzpunkt bzw. auf die Phasen- und Laufzeitkalibrierung	Überwachung von Strukturveränderungen der Teleskope Weiterentwicklung der Phasenkalibrierung Erfassung von Zusatzparametern Untersuchungen zum Einsatz von Wasserdampfadiometern
- 20m RTW - Twin RT	Unterstützung der Navigation von interplanetaren Satellitenmissionen	Teilnahme an dVLBI-Experimenten
- 20m RTW - Twin RT	Nutzung der drei Teleskope als Cluster	Entwicklung neuartiger Beobachtungsszenarien Einsatz phasenstabiler Hardware zur Frequenzdistribution Aufbau eines Softwarekorrelators für lokale Korrelationen Implementation von Delay-Lines zum Zusammenschalten der Twin Teleskope

20m RTW	Aufbau von Quellenkatalogen in neuen Frequenzbändern	Anpassung des 20m RTW an VLBI2010 Beteiligung an internationalen Messkampagnen
Twin RT	Kombination der Referenzsysteme und Verbesserte UT1-Bestimmung	Messung von GNSS Satelliten mit VLBI VLBI Transmitter und Laserreflektor auf Höhenforschungsflugzeug Entwicklung neuartiger Beobachtungsszenarien Einsatz phasenstabiler Hardware zur Frequenzdistribution
- O'Higgins RT	Optimierung des VLBI-Beobachtungsbetriebs	Anpassung an VLBI 2010 Automatisierung, abgesicherte Fernsteuerung Entwicklung flexibler Schedules zum optimierten Wechselbetrieb zwischen VLBI und Download von Satellitendaten in O'Higgins
Korrelator	Übergang zur nächsten Generation der Korrelatorarchitektur und damit nachhaltige Sicherung des VLBI-Beobachtungsbetriebs für die internationalen geodätischen Dienste, Steigerung der Genauigkeit des Korrelationsoutputs	Einführung eines Softwarekorrelators Parallelbetrieb von Hardware- und Softwarekorrelator für mehrere Monate automatische Prozessierung von Vorbereitung bis Qualitätskontrolle Weiterentwicklung existierender Lösungen, Zurückgreifen auf Entwicklungen innerhalb des IVS (Phasecal-Extraktion, Subnetting-Steuerung), Erweiterung der Kapazität (Anzahl Prozessorkerne, Bandbreite), Weiterentwicklung der fringe-fitting-Software
Korrelator	Optimierung des VLBI-Rohdatentransports für schnelle, zuverlässige und automatische Datenübertragungen	Steigerung der Datenübertragungskapazität zum Korrelator Steigerung der Zuverlässigkeit des Datentransports durch Entwicklung automatischer Backup- und Fallback-Lösungen
Korrelator	Unterstützung der Navigation von interplanetaren Satellitenmissionen	Schaffung von Voraussetzungen für echtzeitnahe Korrelation

Laserdistanzmessung

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Laserdistanzmessung - WLRS - SOS-W	Optimierung der Nutzung der Wettzeller Satellitenbeobachtungssysteme	Inbetriebnahme des neuen und des revidierten Systems Einsatz für hochfliegende Satelliten Entfernungsmessung zum Mond mit dem WLRS Analyse der Verbesserungen durch Nutzung der zwei Frequenzen des SOS-W
Transponder - WLRS	präzise Zeitübertragung, Unterstützung von Raumsondenmissionen und Distanzmessung zum Mond	präzise Anbindung ans Zeitsystem des GO Wettzell Beteiligung an wissenschaftlichen Missionen mit Einwegdistanzmessungen über große Distanzen Beteiligung an Studien und Missionen zur Installation eines Lasertransponders auf der Mondoberfläche s. Abschnitt "Zeit und Frequenz"

GNSS Beobachtungsstationen

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
GNSS Beobachtungsstationen	Optimierung der Kombination der existierenden GNSS-Systeme	Verwendung einheitlicher Hardware ständige Überprüfung und Modernisierung der Komponenten Installation weiterer Galileo-tauglicher Hardware
GNSS Beobachtungsstationen	Bereitstellung von Empfängerrohdaten in Echtzeit	Erweiterung der Hard-/Software, Stabilisierung der Netzanbindung auf die notwendige Bandbreite
GNSS Beobachtungsstationen	Ausschöpfen des Genauigkeitspotentials	Aufzeichnung von Umweltbedingungen (Niederschlag, Schnee, etc.) und Vergleich mit beobachtetem Multipath Reanalyse mit einheitlichen Standards
Broadcaster	Casterkonzept für deutlich höhere Auslastungen	Optimierung des Konzeptes, Entwicklungen im Bereich Monitoring und Nutzeradministration

Zeit und Frequenz

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Zeit- und Frequenzsystem	Weiterführung des Beitrages zur internationalen Atomzeit TAI	Laufendhaltung des Zeit- und Frequenzsystems der Station sowie der Ausrüstung zum Zeitvergleich
Zeit- und Frequenzsystem	Erhöhung der Konsistenz der Messsysteme	Zusammenführen aller Messsysteme auf eine einheitliche stabile Zeitskala

Zeit- und Frequenzsystem	geodätische Zeit- und Frequenzvergleiche	präzise Zeit- und Frequenzvergleiche mit Zeitlabors (PTB, DLR, IAPG) mit GNSS, VLBI, Laser
Transponder	präzise Zeitübertragung	Beteiligung am ACES Projekt ELT als Analysezentrum Beteiligung an weiteren optischen Zeitübertragungsexperimenten nach Möglichkeit
Großringlaser "G"	Nutzung als "optischer Maser"	Untersuchung und Simulation der Verbesserung von VLBI Resultaten durch höhere Stabilität der Frequenz Transformation der optischen Frequenz in den Mikrowellenbereich mit einem Frequenzkamm

Gravimetrie

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Kontinuierliche Zeitreihen	Beitrag zum Aufbau eines globalen Schwerereferenzsystems mit hochauflösenden permanenten Schwerezeitreihen	Fortsetzung der kontinuierlichen hochgenauen terrestrischen Messungen in Wettzell, Bad Homburg, Medicina, Concepción mit SG und AG befristete Parallelregistrierung an den beiden Gravimeterstandorten in Wettzell
Vergleichsmessungen	Sicherstellung der gravimetrischen Standards und Einbindung ins SI System	4-jährige Vergleichsmessungen der AG am BIPM Ausbau des GO Wettzell als regionale Schwerevergleichsstation
Integrierte geodätische Netze	Beitrag zu nationalen und internationalen integrierten geodätischen Netzen	Durchführung von Neu- und Wiederholungsmessungen in GREF und ECGN
Korrekturen	Korrektur hydrologischer und atmosphärischer Einflüsse auf Schwere-messungen	Erfassung hydrologischer und atmosphärischer Umweltparameter Weiterentwicklung der gravimetrischen Korrekturmodelle Vereinheitlichung der Korrekturmodelle

Ringlaser

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Großringlaser "G"	Bereitstellung qualitativ hochstehender Messresultate	permanenter und ungestörter Betrieb Weiterführung der Kooperation mit Canterbury (NZ), Pisa (I), Quantenoptik Hannover
Großringlaser "G"	Nutzung der Ringlaserdaten im Rahmen des IERS	Integration der Ringlaser-messungen mit VLBI
Großringlaser "G"	Verbesserte Modellierung der lokalen Sensororientierung	Modellierung von durch lokale Effekte (Wind, Hydrologie) induzierte Rotations- und Orientierungssignalen

Großringlaser "G"	Nutzung als "optischer Maser"	s. Abschnitt "Zeit und Frequenz"
Ringlaser UG, NZ	Signalkorrelation mit anderen großen Ringlasern	Verbesserung der mechanischen Stabilität durch Einbau einer Stabilisierungsstufe Promotion weiterer Ringlaser in internationalen Kooperationen, z.B. im Gran Sasso
Ringlaser CII, NZ	Verbesserung der Phasenstabilität	Test der Durchführbarkeit des Injection Locking am CII Ringlaser
Alternative Konzepte	Einordnung der Eigenschaften von Heliumgyroskop und Atominterferometer im Vergleich zu aktiven Ringlasern	Vergleichsmessungen im Ringlaserlabor, sobald alternative Sensoren verfügbar sind
Geosensor	Ausschöpfen des Potentials des Geosensors in der Rotationsseismik	Weiterbetrieb in Zusammenarbeit mit SIO und LMU

Messung lokaler Effekte

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
lokale Vermessung - Stationsnetz - Footprintnetz - lokale Sensoren	Erfassung lokaler geometrischer Instabilitäten und Untersuchung der Einflüsse auf das lokale Schwere-signal	Regelmäßige Überwachung der Verbindungsvektoren zwischen den Referenzpunkten Routinemäßige Tageslösungen für das Footprint-Netz Zeitreihenanalysen der Neigungsmesser Weiterführung der hydrologischen Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Sektion Ingenieurhydrologie des GFZ Potsdam.
Exzentrizitäten zwischen den Beobachtungstechniken	Auflösung der Widersprüche zwischen geometrischer Exzentrizitätsbestimmung und Phasenzentrumsvariationen	Erweiterung des Vermessungsnetzes in Wettzell im Bereich der Twin Teleskope Einbeziehung von benachbarten SAPOS Stationen in das Footprintnetz in Wettzell Überprüfung der Praktikabilität einer quasi-kontinuierlichen Überwachung der Referenzpunkte der Twin Teleskope

Automatisierung der Systemsteuerung

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Informationstechnik	Integration der Einzelkomponenten in ein Gesamtsystem, Entwicklung einer Konzeption für eine messsystemübergreifenden Stationssteuerung	Laufendhaltung und Betreuung der Informationstechnik Sicherung des zuverlässigen Zugangs zum Internet sowie Absicherung gegenüber Angriffen
Informationstechnik	Automatisierung von Routineaufgaben	umfassendes Monitoring von System- und Umfeldparameter Installation der nötigen Überwachungssysteme Sicherstellung des automatischen/semiautomatischen Betriebs der Messinstrumente
Informationstechnik	Erfassung von Umfeldparametern	Aufbau eines Entwurfsmusters für Datenerfassung
Informationstechnik	Sicherstellung der Langzeitdatenhaltung	Vereinheitlichung der Datenhaltung am GO Wettzell gemäß ERIS Standard
Informationstechnik	Fernsteuerung von VLBI- und SLR-Messungen	Sicherstellung der Netzverbindung und des sicheren Betriebs der Messinstrumente Implementation des zentralen Betriebs der Instrumente des GO Wettzell aus einem zentralen Steuerraum (VLBI bzw. SLR)
Informationstechnik	e-VLBI	Erhöhung der Anschlusskapazität ans Internet

Pilotprojekte

Thema	Projekt
VLBI	Untersuchung der Veränderungen von mechanischem und elektrischem Referenzpunkt bzw. der Phasen- und Laufzeitkalibrierung (Einkopplung des Zeitreferenzpulses), Laufzeitvariationen durch Kabelbiegungen, etc. Nutzung von Lichtwellenleitern
Neue Entwicklungen in Anwendungen von Laser Techniken	Untersuchung der technologischen Voraussetzungen zur Nutzung von optischen Telemetrieaussendungen und von photokonduktiven Antennen zur präzisen Entfernungsmessung zwischen Satellit und Bodenstation.
Ringlaser als optischen Resonator höchster Güte	Verwendung des Ringlasers als "optischen Maser" durch Transformation der Laserfrequenz in den GHz-Bereich mittels eines Frequenzkamms. Untersuchung des Gewinns der Kurzzeitstabilität für VLBI-Beobachtungen
Entwurfsmuster "Data Acquisition"	Entwicklung eines einheitlichen Entwurfsmusters zum effizienten Aufbau von Datenerfassungs- und Verwaltungssystemen.

3 Informationstechnologie, Datenaufbereitung und -archivierung

Der Anspruch an eine echtzeitnahe Verfügbarkeit von Beobachtungen wächst mit den technologischen Entwicklungen ebenso wie die Möglichkeiten routinemäßige Beobachtungen weitestgehend automatisiert auszuwerten. So werden in der Zukunft von VLBI2010 der e-Transfer der Beobachtungsdaten zum Korrelator und die Entwicklung von Softwarekorrelatoren eine bedeutende Rolle spielen. Die Entwicklung und der Einsatz von Expertensystemen werden in bei der Automatisierung von Störungsbehebung und qualitätskontrollierten Auswertungen eine wichtige Rolle spielen.

Die in den weltweit bestehenden Datenzentren verfügbaren geodätischen und geophysikalischen Daten werden zumeist in einfachen File-Systemen organisiert. Fehlende Metainformationen zu den verfügbaren Daten schränken die Recherche in den Datenbeständen sehr ein. Die jeweiligen Datenzentren stellen zudem nur die Datenreihen aus dem eigenen zugeordneten Fachgebiet zur Verfügung, die darüber hinaus in unterschiedlichsten Formaten vorliegen können. Querverweise zu ähnlichen Daten aus geodätischen, geodynamischen oder benachbarten geowissenschaftlichen Bereichen werden nicht gegeben.

Beobachtungsdaten werden mit großem finanziellem und personellem Aufwand erzeugt und werden der wissenschaftlichen Gemeinschaft meist frei zur Verfügung gestellt. Der freie Datenaustausch ist die Grundlage für effizientes wissenschaftliches Arbeiten. Früher wurden in wissenschaftlichen Publikationen Beobachtungsdaten verwandt, die meist aus dem näheren wissenschaftlichen Umfeld stammten. Entweder im Artikel selbst oder in einem separaten Abschnitt wurde auf die verwandten Daten und die sie erzeugende Institution hingewiesen. Im Zuge der allgemeinen Datenzugänglichkeiten werden diese Gepflogenheiten immer mehr ignoriert und ein Ungleichgewicht erzeugt zwischen dem Aufwand der Datengewinnung und der Interpretation. Deshalb sind Bestrebungen zu unterstützen Beobachtungsdaten zu registrieren um sie wissenschaftlichen Veröffentlichungen vergleichbar zitierbar zu machen.

Für die heute notwendige integrale Behandlung der Forschungsaufgaben sind Daten aus anderen Fachdisziplinen notwendig, deren Auffinden schwierig ist. Ein moderne Datenhaltung setzt nicht nur eine langfristige Verfügbarkeit voraus, sondern auch die Möglichkeit Daten über Webdienste zu recherchieren. Bestehende wie neu zu entwickelnde Datenzentren und Portale sollten entsprechende Informationsservices aufbauen.

Die Messdaten und Analysedaten der Geodäsie beruhen zum großen Teil aus Zeitreihen. In einem Pilotprojekt soll eine Methodik der Speicherung von Daten auf Rechnern erprobt werden, die die Suche von Datensätzen unterstützen und die Zugriffe auf Zeitreihen optimiert.

3.1 Möglichkeiten einer echtzeitnahen VLBI-Korrelation

Stand der Entwicklung

Seit 2007 werden die ersten VLBI-Rohdaten mittels elektronischer Datenleitungen von den Radioteleskopen zu den Korrelatoren in Bonn, Washington D.C. (USA), Haystack (USA) und Tsukuba (Japan) übertragen. Hierzu wurde die Internet-Anbindung des Geodätischen Observatoriums Wettzell auf 622 Mbit/sec erhöht. Die größere Kapazität wird insbesondere zur Übertragung von INTENSIVE-Beobachtungen genutzt.

Auf der Seite des Korrelators in Bonn, der zusammen vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR), vom BKG und vom Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn betrieben wird, hängen

die Kapazitäten in erster Linie an der Anbindung an den DFN-Knoten in Sankt Augustin. Über diese Verbindung, die zur Zeit eine nominelle Kapazität von 1 Gbit/s hat, müssen die Datenströme mehrerer Beobachtungsstationen gleichzeitig transportiert werden, was den Bedarf an Bandbreite vervielfacht. Gleichzeitig können daher im Moment nur Beobachtungsdaten von höchstens zwei Observatorien übermittelt werden.

Bei der Ankunft der Daten im Korrelationszentrum sind die Datenströme auf separate Rechner zu leiten, wo die Daten auf speziellen RAID-Systemen hoher Kapazität zwischen gespeichert werden. Hier ist dann als weiterer Arbeitsschritt ein Umkopieren auf originäre Mark5B-VLBI-Magentplattensysteme notwendig, bevor tatsächlich mit der Korrelation begonnen werden kann.

Wegen der Vorgaben durch die Kapazität der Datenleitungen sind die Übertragungszeiten heute noch sehr viel länger als die eigentlichen Beobachtungszeiten. So belaufen sich die Datentransferraten von den verschiedenen Netzwerkstationen zum Korrelator in Bonn momentan im Schnitt auf 100 bis 400 Mbit/s. Aus diesem Grund werden zurzeit routinemäßig in der Hauptsache nur die Daten der einstündigen dUT1-Intensive-Messungen übertragen, während dies für die 24-Stunden-Sessions nur bei Vorliegen von Besonderheiten erfolgt. Dies ist u.a. der Fall für NyAlesund auf Spitzbergen, wo ein Magnetplattentransport übermäßig lange dauert, und für Tsukuba in Japan, für das damit gleichzeitig eine Konvertierung vom K5-Format auf das Mark5-Format erfolgt. Eine Übertragung einer 24-Stunden-Session von NyAlesund auf Spitzbergen nach Bonn dauert ungefähr 70 Stunden. Eine ähnliche Zahl ergibt sich für den Transport aus Japan.

Die angegebene Übertragungszeit ist allerdings nur dann zu realisieren, wenn es nicht zu netzwerkabhängigen oder stationsbedingten Störungen kommt. Wenn diese während der Nacht oder am Wochenende auftreten und kein speziell geschulter Operateur anwesend ist (eher die Regel als die Ausnahme), dauert die Übertragung sehr schnell doppelt so lange. Ein gezieltes Eingreifen ist dann oft wegen der verschiedenen Zeitzonen, z.B. zwischen Japan und Deutschland, nur mit einiger Verzögerung möglich. An dieser Stelle hat die geodätische Arbeitsgruppe schon seit Längerem ihre Kapazitätsgrenzen erreicht, so dass hier ohne personelle Verstärkung nicht mit einer Steigerung des Datendurchsatzes gerechnet werden kann.

Bei den einstündigen dUT1-Intensive-Messungen ist der elektronische Datentransfer ein voller Erfolg, da damit die Latenzzeiten für die dUT1-Ergebnisse zumindest an einem Tag der Woche auf ca. 8 Stunden reduziert werden konnte. Dies kann aber nur deshalb erreicht werden, weil die Daten während der Anwesenheit des Korrelatorpersonals (Montags vormittags) übertragen werden und bei Störungen schnell reagiert werden kann. Eine Anhebung der Beobachtungsbandbreite auf 512 Mbit/s zur Steigerung der Messgenauigkeit oder sogar 2 Gbit/s, wie im VLBI2010-Programm vorgesehen, lässt sich mit den jetzigen Gegebenheiten nicht realisieren.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass e-Transfer in der Zukunft eine bedeutende Rolle spielen wird. Es bedarf dafür aber investiver Maßnahmen, um die derzeitigen Bandbreitenbeschränkungen zwischen den Beobachtungsstationen und dem Korrelator zu beseitigen, damit kürzere Datenübertragungszeiten möglich werden.

Automatisierung von Routineprozessen

Zur Durchführung von Korrelationen ist eine Vielzahl von Routineprozessen abzuarbeiten, die mehr oder weniger stark automatisiert werden können. Vier Bereiche sind zu nennen, die eigenständige Teilaufgaben darstellen. An erster Stelle steht der Transport der Rohdaten von den

Observatorien zum Korrelator, wenn dieser per elektronischem Transfer durchgeführt wird. Zweitens sind die Steuerdateien für den Korrelationsprozess aufzusetzen, drittens ist eine Qualitätsüberprüfung der Ergebnisse durchzuführen und viertens sind die Ergebnisse zu exportieren, wobei für verschiedene Adressaten unterschiedliche Datensätze vorzubereiten sind. Für all diese Schritte ist eine Automatisierung denkbar, für die aber wegen der Komplexität der Vorgänge oder mangelnden Vorhersehbarkeit ein entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Beim erstgenannten Bereich, dem Transport der Rohdaten von den Observatorien zum Korrelator, werden die Daten vom Korrelatorpersonal in Bonn bei den Stationen sequentiell abgerufen. Dies ist deshalb notwendig, weil wegen der limitierten Bandbreite zwischen Netzknoten und Korrelator immer nur Daten einer Station übertragen werden können. Der Versuch zweier Stationen, ihre Daten gleichzeitig zu übertragen, führt im Moment noch zu einem Zusammenbruch der Verbindung. Des Weiteren muss das Korrelatorpersonal unter Berücksichtigung von Prioritäten und Übertragungszeiten eine Reihenfolge festlegen. Zur Reduzierung der Latenzzeit bei UT1-UTC-Intensive-Messungen kann daran gedacht werden, jeden Scan sofort nach Beendigung der Einzelbeobachtung zu übertragen. Dies erfordert eine Weiterentwicklung des Datenübertragungsprogramms "Tsunami" durch Integration des Beobachtungsplans. Auch wenn all diese Schritte nicht vollständig zu automatisieren sind, lassen sich doch Web-basierte Hilfsmittel für Planung und Überwachung entwickeln, die langfristig den personellen Aufwand reduzieren. An aller erster Stelle sind auf jeden Fall Prozeduren zu entwickeln, die einen automatischen Neustart der Datenübertragung gewährleisten, sollte die Verbindung einmal unterbrochen sein, was sehr häufig vorkommt.

Auch bei der eigentlichen Vorbereitung der Korrelation und des Fringefittings sind zurzeit noch nicht alle Schritte automatisiert. Dies liegt insbesondere daran, dass oft zwischen der Planung einer Beobachtungssession und der tatsächlichen Realisierung große Abweichungen bestehen. Unterschiede zum originären Beobachtungsplan entstehen durch den Ausfall von Hardwarekomponenten an einzelnen Stationen oder sogar dem Totalausfall einer ganzen Station. Eine Vielzahl von weiteren Abweichungen, die durch Bedienfehler des Stationspersonals oder nur kurzfristigem Ausfall oder Fehlfunktion von Stationshardware verursacht werden, führen zu einer weiteren Komplizierung. Schließlich ist noch das Gangverhalten der Atomuhren an den Stationen zu analysieren, um entsprechende Parameter für ein Uhrenmodell anzusetzen. Diese Aufgabe erfordert ein hohes Maß an Erfahrung, die zurzeit noch nicht durch automatisierte Prozesse realisiert werden kann. So wird das Aufsetzen der Steuerdateien für die Korrelation insgesamt zwar automatisch ausgeführt, die Anpassung an die Realität muss aber von Hand durchgeführt werden. Diese Arbeiten gilt es, in Zukunft durch entsprechende Skripte oder Programme soweit wie möglich zu automatisieren.

Nach erfolgter Korrelation muss zur Gewinnung der Observablen noch der Fringefitting-Prozess durchgeführt werden. Dieser wurde zwar bereits beim Aufstellen der Steuerdateien vorbereitet, die Steuerdateien müssen aber nachträglich an das Ergebnis der Korrelation angepasst werden. Die gegenseitigen Abhängigkeiten, die immer auch ein Ergebnis der Qualitätskontrolle sind, erschweren eine Automatisierung beträchtlich. Trotzdem sollten aber alle Möglichkeiten zur Automatisierung ausgeschöpft werden, was wiederum einen entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf erzeugt.

Einzig und allein der Export wird schon heute fast vollautomatisch realisiert. Nur in wenigen Fällen ist eine manuelle Interaktion notwendig, wenn z.B. die Datenübertragung aus nicht vorhersehbaren externen Gründen abgebrochen wird.

3.2 Datenhaltung und Informationsgewinnung

Im Rahmen einer DFG-finanzierten CODATA-Arbeitsgruppe wurden Defizite in der Verfügbarkeit wissenschaftlicher Daten, insbesondere zur interdisziplinären Datennutzung, identifiziert und die Ursachen analysiert. Hierin wird festgestellt, dass im wissenschaftlichen Bereich zwar grundsätzlich Bereitschaft besteht, Daten für eine interdisziplinäre Nutzung zur Verfügung zu stellen, aber es ist zur Zeit unüblich, dass die erforderliche Mehrarbeit für Aufbereitung, Kontextdokumentation und Qualitätssicherung im Wissenschaftsbetrieb anerkannt wird. Die klassische Form der Verbreitung wissenschaftlicher Ergebnisse ist ihre Veröffentlichung in Fachzeitschriften, normalerweise ohne Veröffentlichung der zugrunde liegenden Daten. Derartige Zeitschriftenartikel werden im "Citation Index" erfasst. Dieser Index wird zur Leistungsbewertung von Wissenschaftlern herangezogen. Datenveröffentlichungen werden darin bisher nicht berücksichtigt. Projektdaten sind breit über Forschungsinstitute verstreut und werden von Wissenschaftlern erhoben und verwaltet. Aufgrund der fehlenden Anerkennung der mit der Aufbereitung verbundenen Arbeit sind Projektdaten häufig schlecht dokumentiert und somit schwer zugänglich sowie nicht langfristig gesichert. Große Datenbestände bleiben ungenutzt, da sie nur einen kleinen Kreis von Wissenschaftlern bekannt und zugänglich sind (Lautenschlager und Sens, 2003).

Traditionell sind Primärdaten eingebettet in einen singulären Forschungsprozess, ausgeführt von einer definierten Gruppe von Forschern, geprägt von einer linearen Wertschöpfungskette:

Experiment ⇒ Primärdaten ⇒ Sekundärdaten ⇒ Publikation
Akkumulation Datenanalyse Peer-Review

Durch die Möglichkeiten der neuen Technologien und des Internets können einzelne Bestandteile des Forschungszyklus in separate Aktivitäten aufgeteilt werden (Daten-Sammlung, Daten-Auswertung, Daten-Speicherung, usw.) die von verschiedenen Einrichtungen oder Forschungsgruppen durchgeführt werden können. Die Einführung eines begleitenden Archivs und die Referenzierung einzelner wissenschaftlicher Inhalte durch persistente Identifier wie einen DOI-Namen schafft die Möglichkeit anstelle eines linearen Forschungsansatzes, den Wissenschaftlerarbeitsplatz einzubinden in einen idealen Zyklus der Information und des Wissens (siehe Abbildung 3.1). In den zentralen Datenarchiven als Datenmanager werden Mehrwerte geschaffen und so für alle Datennutzer, aber auch für die Datenautoren selber ein neuer Zugang zu Wissen gestaltet wird (nestor Handbuch 2009).

Die Daten mit einem Digital Object Identifier (DOI) sind dann nicht mehr abhängig wie sie in einer Veröffentlichung zitiert werden, sondern haben eine eigenständige Identität und sind als Primärdaten zitierbar, ähnlich wie Zeitschriftenartikel. Somit erhält ein Autor also eine zitierfähige Veröffentlichung, die dann im „Citation Index“ geführt werden kann. Der Digital Object Identifier wurde 1997 eingeführt, um Einheiten geistigen Eigentums in einer interoperativen digitalen Umgebung eindeutig zu identifizieren, zu beschreiben und zu verwalten. Gemanagt wird das System des DOI durch die 1998 gegründete International DOI Foundation (IDF). Über den DOI-Namen sind einer Ressource aktuelle und strukturierte Metadaten zugeordnet. Die Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover, hat ab 2005 in Kooperation mit dem Weltdatenzentrum Klima, Weltdatenzentrum MARE und Datenzentrum des GFZ Potsdam die Rolle der zentralen Registrierungsagentur übernommen. Bei der Zuteilung einer DOI fallen Kosten an, die durch die Registrierungsagentur geregelt sind und die Leistungen im Rahmen einer DOI abdecken. Seit 2010 übernimmt Data

Cite¹ als internationaler Zusammenschluss von nationalen Aktivitäten diese Rolle.

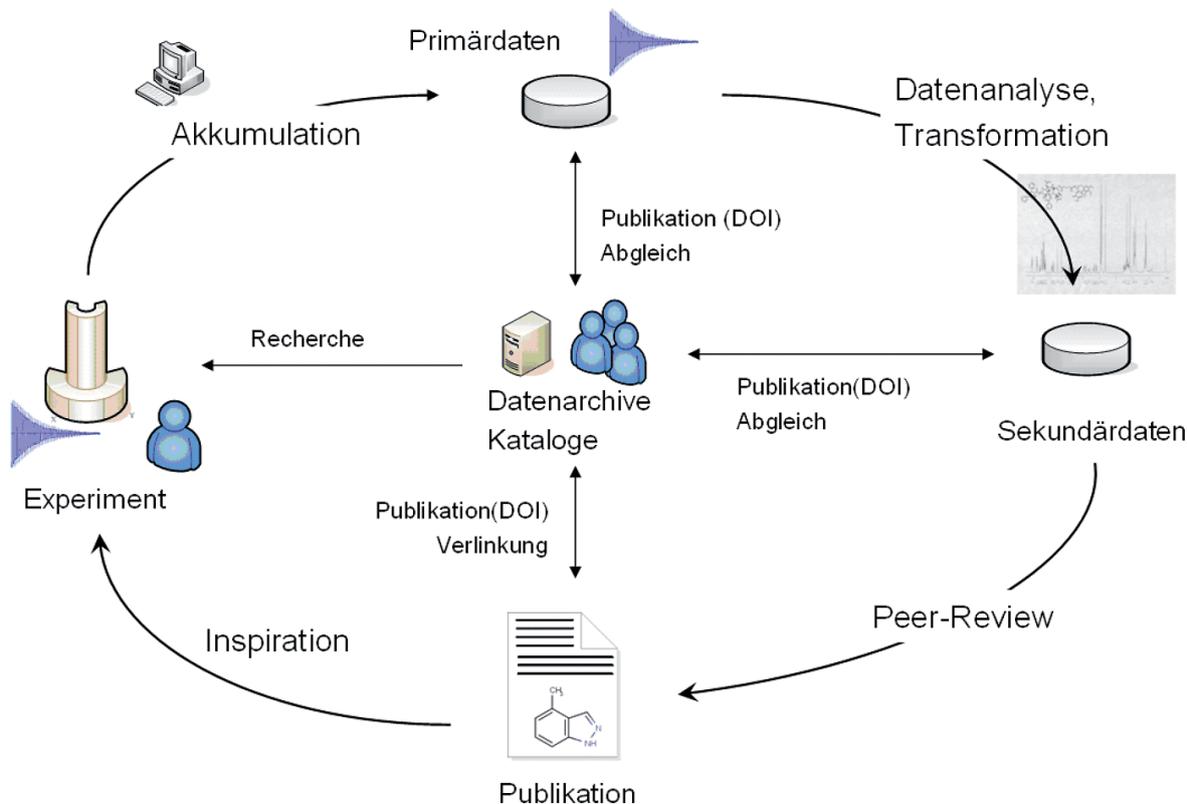


Abbildung 3.1: Ein idealer Zyklus der Information und des Wissens

Über Pangaea² wird ein „Publishing Network for Geoscientific & Environmental Data“ bereitgestellt, das den „Recommendations of the Commission on Professional Self Regulation in Science“ und der „Berlin Declaration on Open Access to Knowledge in the Sciences and Humanities“ folgt.

Weiterhin gibt es wissenschaftliche Journale die Primärdaten nach einem Review-Verfahren veröffentlichen. Eine andere kommerzielle Variante ist, dass führende Wissenschaftsjournale anbieten, die in den Veröffentlichungen verwandten Daten als Bestandteil der Publikation zu speichern.

Ziel ist es, dass der Datengewinnung und Datenaufbereitung eine eigenständige und gleichberechtigte Rolle neben den klassischen Veröffentlichungen eingeräumt wird.

3.2.1 Erweiterung des IERS Daten und Informationssystems (IERS DIS)

Prinzipiell haben die Arbeiten zum IERS DIS einen Stand erreicht, der als hinreichend betrachtet werden kann (Richter und Schwegmann 2006). Im Bereich der geophysikalischen Fluide (Global Geophysical Fluid Centre - GGFC) sind noch Daten aus dem Bereich der Hydrologie, den Gezeiten, dem Mantel und neuere EOP Daten zu integrieren und in XML Formaten aufzubereiten, wobei die erforderlichen Metadaten automatisch erzeugt werden. Durch die Neustrukturierung werden die vorhandenen, abrufbaren Produkte unter den sie antreibenden Fluiden zusammengefasst, wobei zwischen operationellen Produkten, die regelmäßig erzeugt werden und wissenschaftlichen Support Komponenten unterschieden wird. Durch einen Call konnten auch weitere Institutionen gewonnen werden, die im

¹ <http://www.datacite.org>

² <http://www.pangaea.de>

Rahmen anderer Projekte regelmäßig Zeitreihen mit geophysikalischen Fluiden als Antriebskräfte berechnen, wie z.B. atmosphärische, oceanographische (non-tidal) und hydrologische Auflasten, die Vienna Mapping Function, zenith delays, non-tidal short-term atmospheric and oceanic mass variations und consistent atmospheric, oceanic, and hydrological angular momentum functions from a combined ocean-continental hydrosphere model forced with ECMWF's operational analyses. Weitere Datenreihen sind angekündigt. Um eine Langfristigkeit zu garantieren, werden die Produkte in einem Zweistufenverfahren evaluiert und nach einer Probezeit von einem Jahr aufgenommen.

Über das BKG Interaktive Datenanalysetool können beliebige Zeitreihenreihen entweder aus dem IERS DIS oder aber auch eigene Zeitreihen analysiert werden. Es stehen die gängigen Analyseverfahren der Frequenzanalyse: Fourieranalyse (diskrete FFT, auch nichtgleichabständige) und PSD-Berechnung (Powerspektrum), EOF- und EMD-Analyse, principal components, Waveletanalyse, sowohl Filter/Statistikfunktionen: Filterkoeffizienten, Hochpass, Tiefpass, Bandpass, Glättung, Regression, Zeitableitungen, statistische Basisfunktionen (Mittelwert, RMS-Wert, etc.) zur Verfügung.

Um die Zeitreihen und Ergebnisse darzustellen wird ein Plotwerkzeug bereitgestellt, dass ebenfalls auf IERS Daten wie auch auf eigne Datenreihen angewendet werden kann.

Das langfristige Ziel ist es die Nutzerfreundlichkeit nachhaltig zu verbessern und den Nutzerkreis zu vergrößern (bring science to public).

3.2.2 Erstellung eines GGOS Portals

Das GGOS Portal soll der zentrale Zugangspunkt zu allen GGOS Produkten sein. Das Portal wird Wege zu den heterogenen Produkten und Informationen der IAG Dienste bieten. Die Entwicklung und Implementierung des GGOS Portals basiert auf einem modernen Content Management Systems, standardisierten Web Diensten oder Java Technologien um die Anwendungen zur Datendarstellung und –analyse zu realisieren. Ein am ISO Standard 19115 angelehnter Metadatenkatalog ist das Rückgrat für das Informationssystem zur Daten- und Produktsuche wie auch einer möglichen nachgeordneten Datenbearbeitung. Weiter stellt es durch standardisierte Web Dienste, z.B. Katalog- und Webkarten-Dienste, die Informationen zeitgemäß in Maschine-zu-Maschine lesbarer Form bereit.

GGOS Portal Architektur

Der Erfolg des Portals wird von den Daten- und Informationsanbietern abhängen und setzt voraus, dass die Grundsätze der Interoperabilität wie z.B. einheitliche Metadaten befolgt werden. Die GGOS Interoperabilität basiert auf nicht proprietären Standards wie ISO oder DIF. Die eXtensible Markup Language (XML) wurde zu einem quasi Standard um Daten und Informationen über das Internet auszutauschen. Insbesondere Web Dienste die eine Maschine-zu-Maschine Kommunikation erlauben basieren auf XML basierten Standards wie SOAP (Simple Object Access Protocol - ein Netzwerkprotokoll, mit dessen Hilfe Daten zwischen Systemen ausgetauscht werden, WSDL (Web Services Description Language ist eine plattform-, programmiersprachen- und protokollunabhängige Beschreibungssprache für Netzwerkdienste (Webservices) zum Austausch von Nachrichten auf Basis von XML).

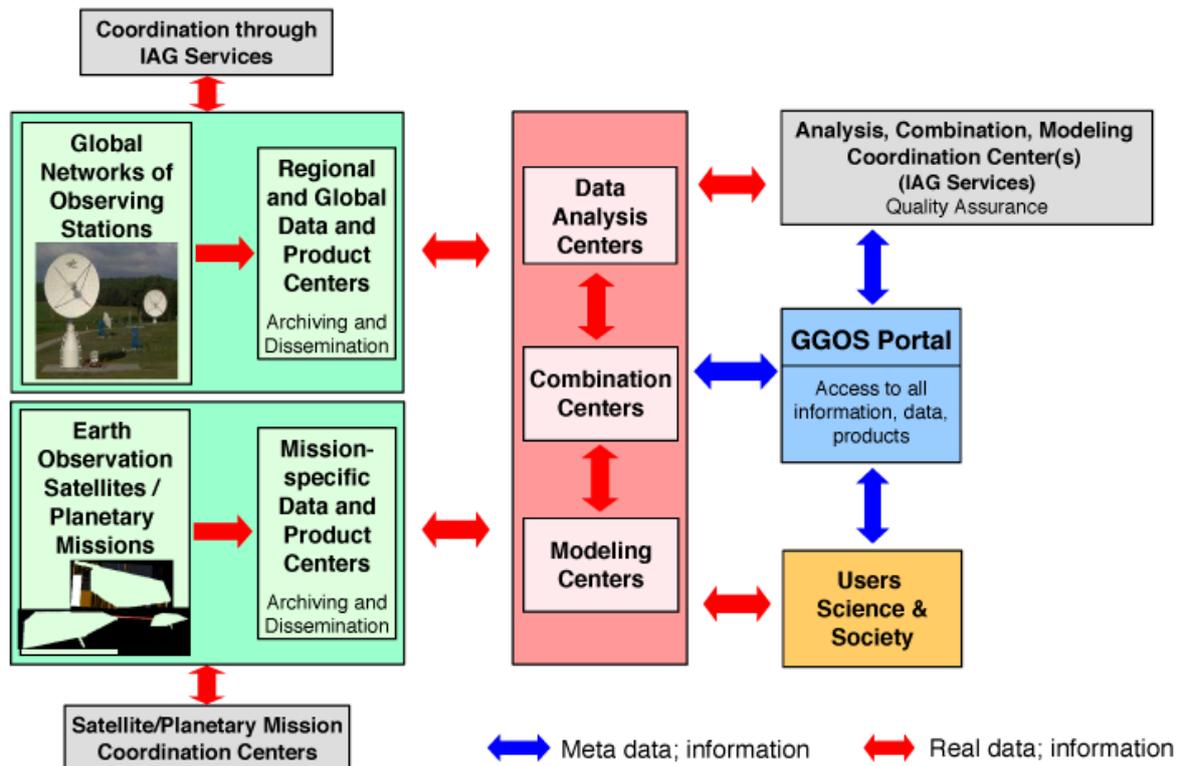


Abbildung 3.2: GGOS Systemdesign, führt den Nutzer durch das Portal zu den dahinterliegenden Daten, Produkten und Informationen.

Metadaten zu Daten, Produkte und Informationen die durch die IAG Dienste bereitgestellt werden, werden katalogisiert und frei zugänglich bereitgestellt. Der Katalog wie auch die verwendeten Thesauri sind Teil der Interoperabilitätsspezifikationen einschließlich der Standardsuche und Portrayaldienste wie der Web Map Service (WMS).

Die Funktionen des GGOS Portals wie Suchmöglichkeiten für Stationen, Satelliten, Daten, Produkte, Institutionen, Data Mining Werkzeuge, Visualisierungen, Verbindungen zu anderen Metadatenkatalogen werden durch das GGOS Clearinghouse unterstützt. Clearinghouse im Anwendungsbereich GIS ist eine Komponente, physikalisch oder virtuell, die Informationen, Metadaten und Daten sammelt, speichert und verteilt. Es stellt den Zugang zum im Internet verteilten Kataloge und Registraturen entsprechen ISO 19135 her, um Kataloge und Dienste zu identifizieren, die den Interoperabilitätsanforderungen von GGOS genügen (Abbildung 3.2). Gleichzeitig dient es als Registratur für andere Web-basierten Registrierdienste.

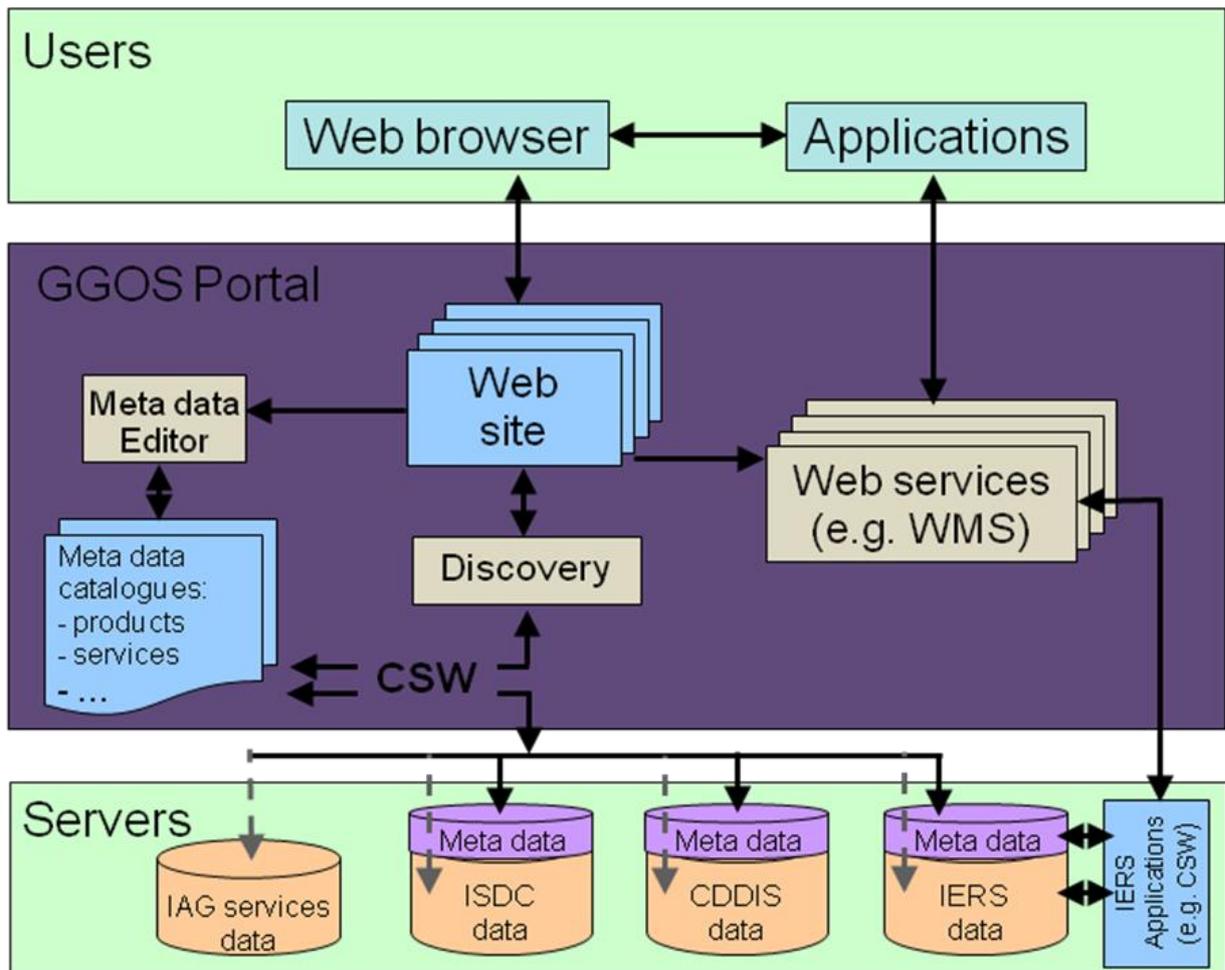


Abbildung 3.3: GGOS Portalarchitektur

Die im Clearinghouse vorgehaltenen Metadaten können durch einen Metadateneditor, "Harvesting" durch Funktionen im GGOS Portal oder durch XML Templates bzw. Skripte bereitgestellt werden (Abbildung 3.3). Das BKG wird die verschiedenen IAG Dienste und Komponenten unterstützen durch Konsultation, Erstellung von Templates und Software Werkzeuge und die Bereitstellung eines Metadateneditors um standardisierte Metadaten für alle GGOS Produkte zu kreieren.

Ein Prototyp des GGOS Portals ist auf der 16. Sitzung des GGOS Steering Committee im Mai 2010 vorgestellt worden (Abbildung 3.4). Die technischen Funktionalitäten für einen Probetrieb sind gegeben, es erfolgt nun die Befüllungsphase durch die IAG Dienste und andere GGOS Komponenten.

Die Entwicklung des GGOS Portals erfolgt in enger Kooperation mit den GEO (Group on Earth Observation) Aktivitäten bezüglich der Standards und Interoperabilitätsvereinbarungen und stellt somit einen substanziellen Beitrag zu GEOSS (Global Earth Observing System of Systems) dar. Das BKG beteiligt sich mit seiner Expertise an an den GEOSS Architecture Implementation Pilot.

Ziel ist die Erstellung des GGOS Portals als multifunktionaler Einstiegspunkt für die Projekte GGOS/GEOSS.

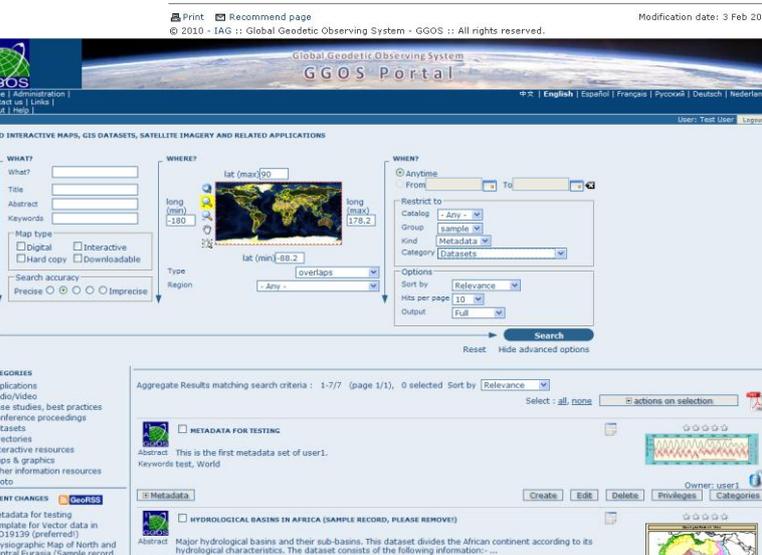
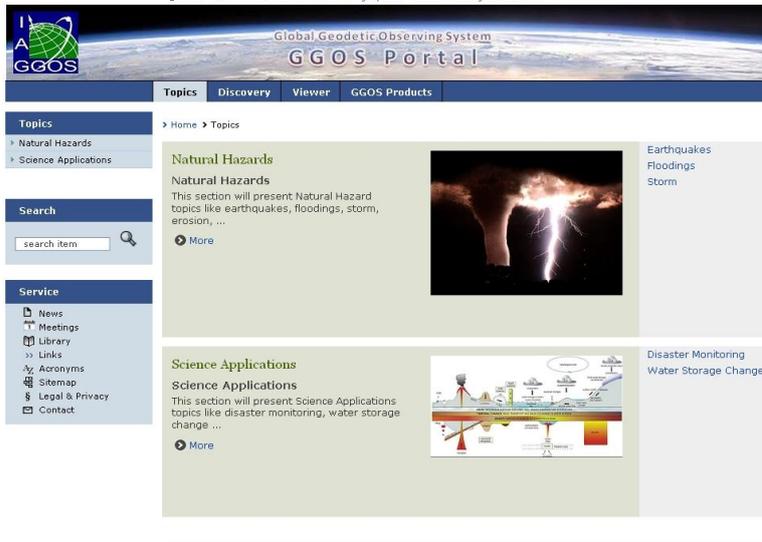
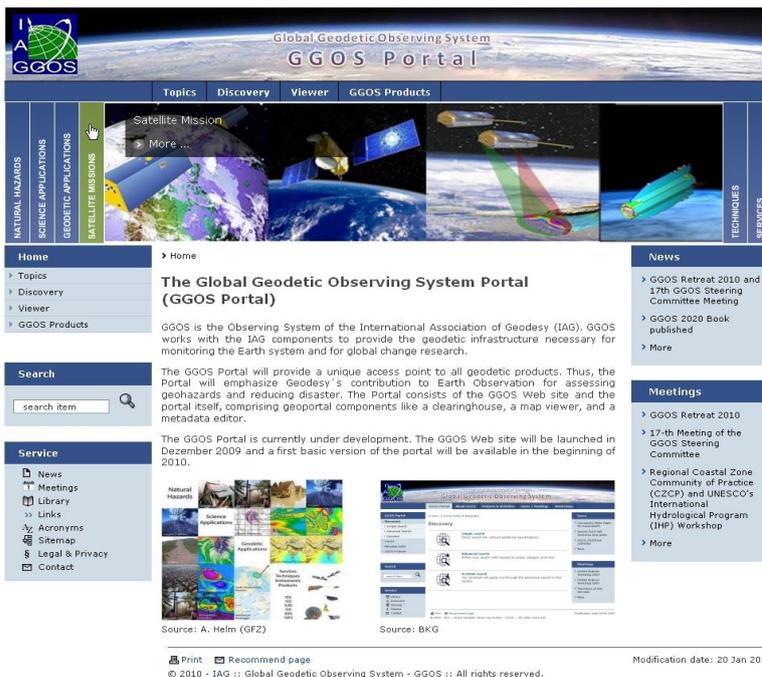


Abbildung 3.4: Screenshots des GGOS Portals oben: Einstiegsseite, mitte: Überblick über aktuelle Themen, unten: erweiterte Suchfunktion

3.2.3 FGS Methodenbank, Verknüpfung der geodätisch-geophysikalischen Zeitreihen mit Modellen zur Erdrotation

Earth Rotation Informations System - ERIS

Das Projekt ERIS (Earth Rotation Information System) wird seit Juni 2006 am BKG bearbeitet. ERIS ist eingebunden in die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Forschergruppe „Erdrotation und globale dynamische Prozesse“. Dieses Jahr bewilligte die DFG einen Folgeantrag für weitere 3 Jahre. ERIS dient als Entwicklungs- und Erprobungsplattform neuer Werkzeuge für den interaktiven Datenzugriff über das Internet.

Das Ziel des Projektes ERIS die Entwicklung eines Portals, das Daten, Modelle, wissenschaftliche Informationen und Verfahren integriert unter Berücksichtigung des aktuellen Forschungsstandes für die Nutzung durch Experten wie interessierte Laien. Das Internetportal <http://www.erdrotation.de> wurde ständig weiter ausgebaut und ergänzt. So werden neben dem eigentlichen Informationsportal die Aktivitäten der Forschergruppe vorgestellt sowie interne Seiten für den Daten- und Informationsaustausch bereitgestellt.

Ein weiterer Fokus lag in der Erstellung von Werkzeugen zur Visualisierung und Bearbeitung von Zeitreihen:

- Erweiterung des EOP-Reader: Dieses Tool erlaubt es, nutzerspezifische Daten aus geodätischen Zeitreihen zu extrahieren und zu exportieren.
- Implementierung von ausgewählten Routinen der SOFA (Standards of Fundamental Astronomy) –Softwarebibliothek: Diese erlauben u.a. verschiedene Kalender-Umrechnungen, die Berechnung von Ephemeriden und die Umrechnung zwischen verschiedenen Referenzsystemen.
- Entwicklung, Test und Liveschaltung des Datenanalysetool: Hier werden Analyseverfahren wie Spektralanalysen, verschiedene Filter und Approximationen bereitgestellt, die sowohl auf vorhandene und implementierte Zeitreihen als auch auf nutzereigene Daten angewandt werden können. Als Ausgabe werden die Ergebnisse in standardisierten Datenformaten und als Graphik angeboten. Der Zugang zu diesem Tool, Hinweise zur Anwendung sowie ein Benutzerhandbuch sind auf dem ERIS-Portal unter www.erdrotation.de/ida¹ zu finden.

Mit einem in der Entwicklung befindlichen Earth Rotation Simulation Tool sollen die Erdrotation und alle Faktoren, die sie beeinflussen, in ihrer Größenordnung dargestellt und miteinander verknüpft werden. Dazu sollen verschiedene Modelle in ihrer Dynamik untereinander sowie mit Daten zur Erdrotation verglichen und ihre Interaktion simuliert werden.

Die Anwendung soll als Web-Applikation realisiert werden, in der der Nutzer die Möglichkeit hat, verschiedene Daten und Modelle auszuwählen, die miteinander kombiniert werden sollen. Dabei sollen auch die bereits im Datenanalysetool vorhandenen Verfahren und Funktionalitäten genutzt werden. Ziel ist hier das Wissenschaftler benachbarter Disziplinen wie auch interessierte Laien eine Werkzeug bekommen, um die wissenschaftlichen Ergebnisse sich fachgerecht zu erschließen. Das Simulationstool soll mit der Astro-Toolbox verknüpft werden.

¹ <http://www.erdrotation.de/ida>

Astro-Toolbox

Die Astro-Toolbox ist frei verfügbar unter der GPL (Gnu Public License¹). Sie bietet die Möglichkeit, verschiedene Tools (einzelne, auch eigenständige Module) zu komplexen Lösungen zu verschalten. Der Datenaustausch erfolgt über einige spezielle Objekte, die jeweils all die Informationen umfassen, die von angeschlossenen Tools benötigt werden. Die Steuerung ist sowohl über eine Weboberfläche als auch direkt von einem lokalen Rechner aus möglich. Die im FGS-Programm angesprochenen Vorhaben lassen sich durch entsprechende Erweiterungen und Ergänzungen gut erfüllen. Früher war die Rede von einer Methoden-Datenbank. Diese ist aber komplett in die Astro-Toolbox eingemündet. Viele grundlegende Methoden wurden aber in Visual C# neu gefasst, sowohl in 16-stelliger, als auch in 32-stelliger Rechengenauigkeit. Somit stellen diese das Fundament der modernen Methodenbank dar. Sie arbeiten sehr effizient, da sie in "echte" Programme eingebettet sind und "richtig" übersetzt werden. Eine gleichermaßen flexible Handhabung wie bei der Astro-Toolbox wurde hier aber nicht angestrebt. Wegen der Unmengen von Rechenoperationen, die oft durchzuführen sind, empfiehlt sich das spezielle "Zuschneiden" der Module zu effizient ablaufenden Programmsystemen. Da es sich aber durchweg um Objekte im Sinne der objektorientierten Programmierung handelt, hält sich der Aufwand in Grenzen. Die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit ist der Lohn dafür.

Ziel ist es, ein Werkzeug für Wissenschaftler zur Untersuchung von Erdrotationsschwankungen und für den interessierten Laien zur anschaulichen Darstellung der komplexen Zusammenhänge zu erstellen.

3.2.4 AGrav - eine internationale Datenbank für Absolutschweremessungen

Die ständig steigende Zahl von Absolutgravimetern und Absolutschweremessungen weltweit zeigt die Notwendigkeit einer Übersicht über Stationen, Beobachtungen, Instrumente sowie zuständige Institutionen. Als Beitrag zum IGFS wurde in einer gemeinsamen Entwicklung von BKG und BGI eine relationale Datenbank entworfen und implementiert, die inzwischen operativen Status erreicht hat. Zwei Zielstellungen werden verfolgt. Mit frei verfügbaren Meta-Daten und Kontaktangaben gibt die Datenbank einen Überblick über die bestehenden Stationen und Messungen, dient als Plattform für interdisziplinäre Zusammenarbeit und ermöglicht die Koordinierung zukünftiger Messungen. Weiterhin ist der Austausch von Messungsdaten und Prozessierungsergebnissen zwischen den beteiligten Gruppen möglich. Gleichzeitig wird die dauerhafte Verfügbarkeit dieser Daten sichergestellt. Zukünftig wird die Datenbank zur Realisierung eines internationalen Schwerereferenzsystems beitragen und eine Basis für eine geophysikalische Interpretation der Absolutschweremessungen in einem globalen Rahmen bilden.

Um Datenaustausch unter Berücksichtigung der Urheberrechte zu ermöglichen, werden drei Stufen unterschieden: Die niedrigste Stufe besteht im Austausch von Stationsinformationen einschließlich der Koordinaten, während die zweite Stufe darüber hinaus die Angabe von Messzeiträumen, nicht jedoch die Ergebnisse enthält. Damit wird der Kontakt und der individuelle Austausch von Informationen ermöglicht. In der dritten Stufe werden auch Schwerewerte gespeichert und zur Verfügung gestellt, die jedoch nur zwischen den beitragenden Institutionen mit voller Auflösung zur ausgetauscht werden, für den allgemeinen Zugriff werden diese Daten auf 1 mGal (10^{-5} nm/s²) gerundet dargestellt.

Die relationale Datenbank ist in MySQL implementiert und läuft in gespiegeltem Betrieb auf einem Server des BKG in Frankfurt (<http://agrav.bkg.bund.de>) und des BGI in Toulouse (<http://bgi.dtp.obs-mip.fr>). Die web-basierte Benutzerschnittstelle beinhaltet auch eine inter-

¹ <http://www.Astro-Toolbox.com>

aktive Kartendarstellung der Stationen (Abbildung 3.5) und ermöglicht ohne Authentifizierung den Zugang zu Meta-Daten. Nach Anmeldung am System werden die vollständigen Informationen zugänglich. In beiden Fällen vermittelt eine durchsuchbare Listenansicht mit ausgewählten Feldern einen Überblick (Abbildung 3.6). Durch Auswahl aus der Liste wird in einer Detailansicht der vollständige Datensatz angezeigt (Abbildung 3.7). Desweiteren besteht die Möglichkeit, Datei-basierte Informationen,

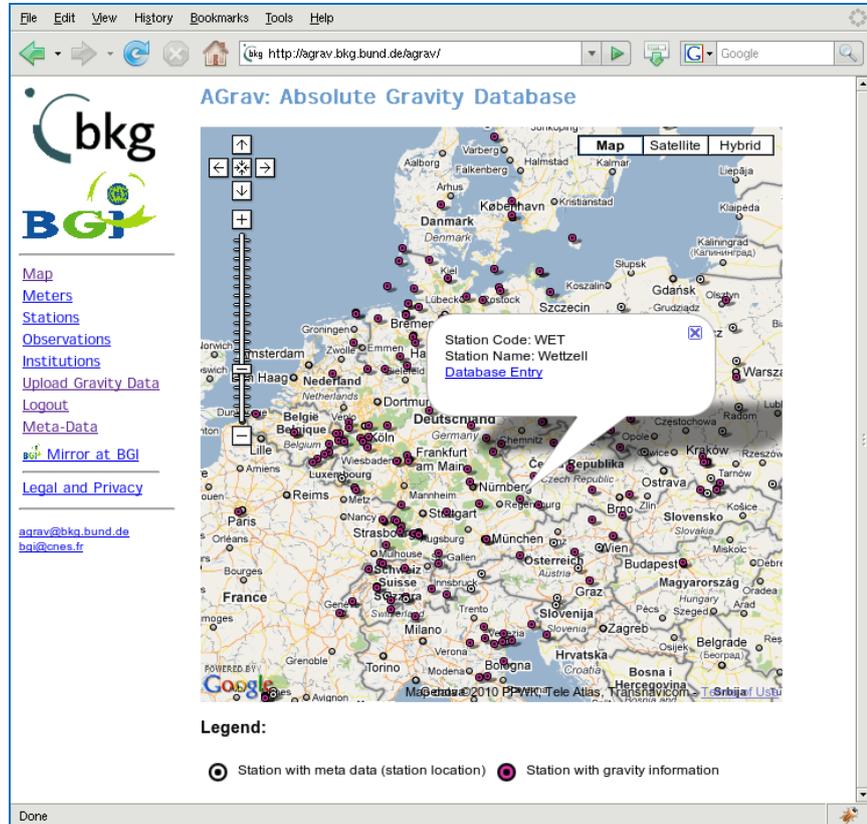


Abbildung 3.5: Einstiegseite mit Kartendarstellung

wie beispielsweise Stationsbeschreibungen den Datensätzen zuzuordnen und abzufragen.

Zum Datenaustausch wird ein Dateiformat benötigt, das sowohl Angaben zur Lage der Station, zu Details der Messung und Prozessierung sowie den Schwerewert und den Gradienten enthält. Die "project-files", die von der g-Software des Instrumentenherstellers MicroG-LaCoste während der Prozessierung von Messungen mit FG5 und A10 Absolutgravimetern generiert werden dafür verwendet. Für das Hinzufügen neuer Messungen oder die Aktualisierung bestehender dient ein in perl geschriebenes Programm, welches auch über ein web-Formular aufgerufen werden kann und dem Nutzer so eine eigenständige Verwaltung der eigenen Daten in der Datenbank ermöglicht.

Die Weiterentwicklung der Datenbank auch im Rahmen der „Working Group for Absolute Gravity“ (WGAG) soll die weltweite Beteiligung von Institutionen und Gruppen mit Absolutgravimetern ausbauen und so einerseits zu einer Realisierung eines neuen internationalen Schwerereferenz-Systems beitragen und andererseits als Beitrag zu GGOS die zeitliche Variation der Schwerebeschleunigung auf einer Vielzahl Stationen dokumentieren.

Overview: Observation Epochs

Search:

Details	Class	Meter Type	Meter Serial	Country	Site Code	Site Name	Point	Data Provider	Gravity	Reference Time	Details
Details	<300	JILAg	003	DE	WET	Wetzell	0162 IIE	9808360000	1989-09-01 00:00:00	Details	
Details	<300	JILAg	003	DE	WET	Wetzell	0166 IIE	9808360000	1992-02-01 00:00:00	Details	
Details	<300	JILAg	003	DE	WET	Wetzell	0162 IIE	9808360000	1992-02-01 00:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2000-03-01 18:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2000-08-01 12:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2000-08-19 04:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AS BKG	9808350000	2000-10-24 22:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2002-01-19 02:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2002-01-19 20:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2002-06-11 20:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2002-06-12 12:00:00	Details	
Details	<300	FG5	301	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2002-12-03 10:00:00	Details	
Details	<300	FG5	301	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2003-04-03 04:00:00	Details	
Details	<300	FG5	301	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2003-08-14 10:00:00	Details	
Details	<300	FG5	301	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2004-01-09 06:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2004-11-04 22:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2004-11-05 16:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2004-11-06 00:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2005-03-10 02:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2005-03-10 22:00:00	Details	
Details	<300	FG5	215	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2005-07-15 02:00:00	Details	
Details	<300	FG5	215	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2005-07-15 14:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2005-11-28 02:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2005-11-28 20:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2006-05-11 04:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2006-05-11 22:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2006-12-07 02:00:00	Details	
Details	<300	FG5	101	DE	WET	Wetzell	AA BKG	9808350000	2006-12-07 22:00:00	Details	

All units are [SI-units](#) | Gravity values are given in nm/s² | Conversation: 1µGal = 10nm/s²

Abbildung 3.6: Listenansicht der Absolutschweremessungen in Wetzell, Anzeige von Meta-Daten

Edit: Processing Results

pkProcID 6402

Status	last
Project-Name	WET_AA_S_101_110506a_weise
Observation Time	11 .05 .2006 .22 .34 .30
Processing Time	18 .06 .2007 .13 .40 .49
Submission Time	20 .07 .2009 .08 .04 .39
Gravity [nm/s ²]	9808352781.0
Precision [nm/s ²]	2
Accuracy [nm/s ²]	19
Set Scatter [nm/s ²]	7
Reference Height [m]	0.1387
Datum Height [m]	1.2500
Factory Height [m]	1.1632
Gradient [nm/s ² /m]	-3320
Airpressure Admittance [nm/s ² /hPa]	3.0000
Nominal Airpressure [hPa]	941.66
Rubidium Frequency [Hz]	1000000.013100
Laser Modulation	1165.21

Abbildung 3.7: Detailansicht für eine Messung aus dem Jahre 2006, Anzeige von Prozessierungsdetails

3.2.5 OpenADB, ein offenes Webportal für Altimeterdaten

Das DGFI führt unter dem Namen OpenADB ein offenes Webportal¹, das den Zugriff auf die Daten aller aktuellen Altimetermissionen (Geosat, ERS-1, TOPEX, ERS-2, GFO, Jason-1, ENVISAT, ICESat, Jason-2, in Kürze auch CryoSat-2 und SARAL/Altika) gewährleistet. Die Aufnahme neuer Missionsdaten ist – soweit kein öffentlicher Zugang besteht – durch mehrere, von den Raumfahrtagenturen akzeptierte Projekte sichergestellt. Die wesentlichen Parameter der Missionsdaten werden in eine generische, d.h. weitgehend missions-unabhängige Datenstruktur umgesetzt, um eine einheitliche Schnittstelle für nachfolgende Analyseprogramme zu realisieren. Die Datenbestände bestehen in der Regel in 1Hz Messungen. Mit der Aufnahme hochfrequenter Messungen (mit 10, 20 bzw. 40 Hz Abtastung) erreicht das Datenvolumen den TerraByte-Bereich. Die Abspeicherung der Daten erfolgt deshalb binär; dies gewährleistet zugleich schnelle Lese- und Schreiboperationen. Als wesentliches Merkmal der OpenADB Datenbasis ist es möglich, mehrere Versionen eines Parameters gleichzeitig zu verwalten. Diese als MVA (Multi-Version-Altimetry) bezeichnete Struktur trägt dem Umstand Rechnung, dass in unregelmäßigen Abständen neue Bahninformationen oder verbesserte Korrekturmodelle bereitstehen, die möglichst schnell aufgenommen werden, ohne die bisherigen Parameterwerte sofort zu löschen.

Registrierte Nutzer können mit dem OpenADB Webportal die verfügbaren Datenbestände erkunden (vgl. Abbildung 3.8) und Auszüge bestellen. Dazu können sie vorgegebene oder selbst definierte Gebiete und ein Datenformat auswählen, die Mission bestimmen und einen Zeitraum festlegen. Der Auftrag wird entgegen genommen und im „batch“-Betrieb ausgeführt. Nach Fertigstellung wird dem Nutzer durch E-Mail ein Link auf einen Passwort-geschützten Bereich eines ftp-Servers mitgeteilt, von dem die Daten kopiert werden können. Das Portal soll einfach bedienbar sein und gut dokumentiert werden um auch Nutzer mit wenig Erfahrung in der Altimetrie anzusprechen. In einem „expert-mode“ kann das Datenformat aber auch selbst bestimmt und sogar Rechenoperationen mit den Parametern durchgeführt werden.

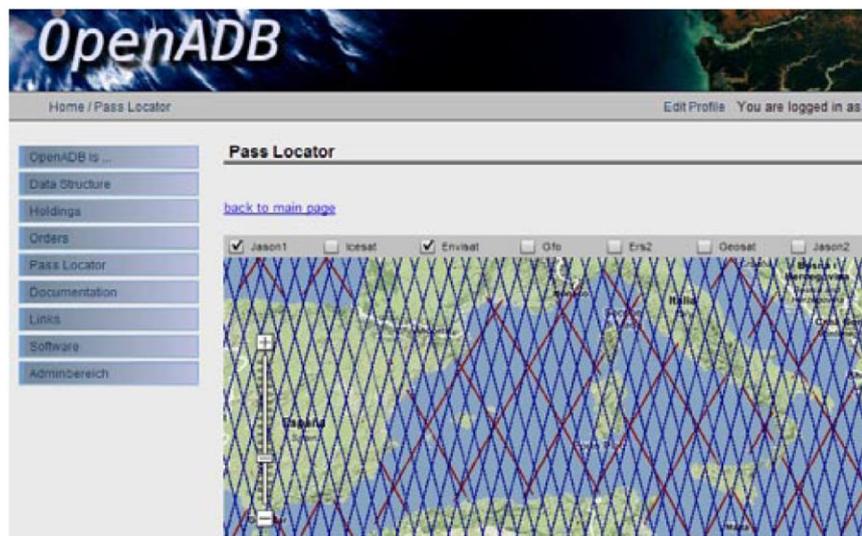


Abbildung 3.8: Das OpenADB Webportal mit der Anzeige der Bodenspuren („pass locator“) von Jason-1 und ENVISAT für den westlichen Mittelmeerraum.

¹ <http://openadb.dgfi.badw.de>

3.2.6 Metadatenkatalog

Metadaten sind Daten über Daten, d.h. beschreibende Informationen der eigentlichen Daten. Es sind strukturierte Daten, mit deren Hilfe eine Informationsressource beschrieben und dadurch besser auffindbar gemacht wird. Metadaten sind maschinenlesbare Informationen, d.h. mit Hilfe von Programmen (Metadaten-Suchmaschinen, Metadaten-Brokern) können Metadatenbestände durchsucht werden.

Metadaten-Broker können verschiedene Metadaten-Quellen durchsuchen, so dass über ein zentrales Interface beliebig viele Metadaten-Quellen durchsucht werden können. Dazu ist es erforderlich dass alle Metadaten einem einheitlichen Standard folgen oder zumindest dass die verwendeten Standards durch Mappings (automatisch) aufeinander abgebildet werden können. Die Interoperabilität und Vergleichbarkeit von Metadaten hängt wesentlich von den verwendeten Standards und existierenden cross-mappings zwischen diesen Standards ab.

Geodateninfrastruktur / Interoperabilität

Um Geodaten über wissenschaftliche Fachdisziplinen bzw. über Organisationsgrenzen hinweg nutzen zu können, muss in globaler Zusammenarbeit eine interoperable Geodateninfrastruktur aufgebaut werden. Dazu müssen geeignete Organisationsstrukturen etabliert, Metadatenmodelle und -profile entwickelt sowie geeignete Architekturen bereitgestellt werden. Um die Interoperabilität zu gewährleisten müssen diese Arbeiten an den Standards der „International Organization for Standardization“ (ISO) und des „Open GIS Consortium“ (OGC) ausgerichtet sein. Dabei ist die Zusammenstellung eines gemeinsamen Vorrats an Schlagworten für eine einheitliche Beschreibung des Datenbestandes auch auf einer semantischen Ebene von Bedeutung, um die Daten in einen interpretierbaren und vor allem durch Maschinen (d.h. automatisch) auswertbaren Sachzusammenhang einzuordnen.

Metadatenmodelle und -profile

Basierend auf der „Unified Modeling Language“ (UML) liefern die Normen der ISO191xx-Familie verbindliche Schablonen zur Modellierung von Metadaten. Damit ist allerdings noch nicht der Austausch von Metadaten gewährleistet, da keine Vorgaben für Formate und Protokolle gemacht werden. Bei der Entwicklung von Profilen verbleiben eine Vielfalt von möglichen Gestaltungsformen sowohl auf inhaltlicher als auch technologischer Ebene (Applikationsprofil).

Der ISO 19115 Standard „Geographic information – Metadata“ wurde mit dem Ziel entwickelt, die Ansprüche an einen Metadatensatz aus möglichst vielen Disziplinen zu erfüllen. Sollten aber dennoch spezielle Anforderungen aus einem bestimmten Anwendungsbereich nicht mit der vorhandenen Struktur abgebildet werden können, sind Regeln zur Erweiterung mit in den Standard aufgenommen. Somit wird eine größtmögliche Flexibilität erreicht, die eine problemlose Anwendung des Standards auch auf die Datensätze im Umfeld der Erdrotation und Referenzsysteme erlaubt.

Solche Erweiterungen haben allerdings den Nachteil, dass sie für „Außenstehende“ zwar lesbar, jedoch nicht unbedingt interpretierbar sind. Um die Belange aller Beteiligten abzudecken, sollen alle Erweiterungs- und Interpretationsmöglichkeiten zwar genutzt, müssen aber abgestimmt in einem gemeinsamen Profil etabliert werden.

Sollen unterschiedliche Aspekte raumbezogener Daten, etwa Umwelt- und Katasterkarten, in einem übergeordneten Kontext verknüpft werden, müssen entweder die dafür benötigten Implementierungen an verschiedene Profile angepasst werden, oder aber man einigt sich auf einen kleinsten gemeinsamen Nenner, ein gemeinsames, abgestimmtes Profil

mit umfassenden Sprachumfang (Häner et al. 2004). Vorteile und Nachteile:

Vorteile	Nachteile
Einheitliches Vokabular, einheitliche Protokolle	Nicht unerheblicher Aufwand für Abstimmungsprozesse
Redundanzfreier Informationsaustausch	Notwendigkeit von Kompromissbildungen
Weitgehend automatisierter und transparenter Prozess des Datenaustausches	Ein kleinster gemeinsamer Nenner ist möglicherweise sehr groß
Kein Verlust von spezifischen Daten	
Keine spezifischen Dialekte, die angepasste Software erfordern	
Einheitliche Rechercheoberflächen und Visualisierung	
Minimierung des technologischen Aufwands	

Formate und Protokolle

Die Vormachtstellung unter den Protokollen nimmt unangefochten die „eXtensible Markup Language“ (XML) ein. Es ist abzusehen, dass XML, schon jetzt ein Quasistandard, die Basis für einen grundlegenden und flexiblen Austausch von Geodaten bilden wird. Mit der „Geographic information – Metadata – Implementation Specification“ (ISO 19139) wird durch die Vorgabe der Codierung in XML und der verbindlichen Zusammenstellung relevanter ISO-Normen in einer „XML Schema Definition“ (XSD) die Basis für eine plattform- und systemübergreifende Kommunikation gelegt.

Ein gemeinsames Metadatenmodell im IERS und auch in GGOS sollte zunächst die Kernelemente des ISO 19115 Standards als Grundlage für ein Metadatenmanagement übernehmen (Schwegmann und Richter, 2010). Im ISO Standard sind alle Element (auch die Kernelemente) mandatory (m), conditional (c) oder optional (o). Es ist zu überlegen, ob die Kernelemente in GGOS alle mandatory gesetzt werden sollen oder entsprechend der ISO Charakterisierung übernommen werden sollen. Darüber hinaus gehend ist zu überlegen, welche Felder des ISO 19115 Standards weiterhin im GGOS Metadatenmodell Eingang finden und in welcher Ausprägung (m, c, o) (Tabelle 3.1).

Auf inhaltlicher Ebene ist ein Vokabular (Schlagwortlisten, Thesauri) zu vereinbaren, das allen Anwendungsfeldern genügt und sowohl zur Erzeugung der Metadaten als auch zur Recherche verwendet wird. Die Abstimmung gemeinsamer Schlagwortlisten und Thesauri ist hier von großer Bedeutung, damit z.B. bei der Recherche nach dem Begriff „EOP“ in allen Informationsdiensten Treffer zum Thema „Earth orientation parameter“ gefunden werden.

Ziel ist die Erstellung des GGOS Portals als multifunktionaler Einstiegspunkt für die Projekte GGOS/GEOSS.

Tabelle 3.1: Kernmetadatensatz für IERS/GGOS

ISO19115 metadata entity set information	ISO No	Metadata elements	IERS GGOS	
MD_Metadata	2	Metadata file identifier	o	
	10	Metadata standard name	o	
	11	Metadata standard version	o	
	3	Metadata language	c	
	4	Metadata character set	c	
	8	Metadata point of contact	m	
	9	Metadata date stamp	m	
	6	Scope to which the metadata applies	c	
MD_Identification	360	Dataset title	m	
	361	Dataset short title	o	
	362	Dataset reference date	m	
	29	Dataset responsible party	m	
	25	Abstract describing the dataset	m	
	33	Descriptive keywords	m	
	28	Status	o	
	MD_DataIdentification	37	Spatial representation type	o
		38	Spatial resolution of the dataset	m
		39	Dataset language	m
		40	Dataset character set	c
		41	Dataset topic category	m
		42	Geographic location	
		43	bounding box or geographic identifier	m
	45	Vertical and temporal extent of dataset	m	
MD_Constraints	71	Constraints on using the resource	o	
DQ_DataQuality	79	Scope of data	m	
	81	Lineage statement	c	
	135	Value unit for reporting a data quality result	o	
	137	Quantitative value of the evaluation procedure	o	
MD_MaintenanceInformation	143	Maintenance frequency	o	
MD_ReferenceSystem	196	Reference system	m	
MD_Distribution	271	Distribution format	m	
	277	On-line resource	m	
	285	Format name	m	
	286	Format version	m	
MD_MetadataExtension-Information	14	Information on metadata extensions	o	
MD_ApplicationSchema-Information	321	Application schema information	o	

(m = mandatory, c = conditional, o = optional, (o) = not part of core set).

3.2.7 Datenhaltung von Zeitreihen (Pilotprojekt)

Die Messdaten und Analysedaten der Geodäsie beruhen zum großen Teil aus Zeitreihen. Es soll eine Methodik der Speicherung von Daten auf Rechnern gefunden werden, um eine Optimierung der Zugriffe auf die Zeitreihen zu ermöglichen. Gleichzeitig sollen Verfahren ermittelt werden, die die Metainformationen über diese Zeitreihen erfassen und die Suche von Datensätzen unterstützen.

3.3 Tabellarische Zusammenfassung der Ziele

Anforderungen an echtzeitnahen Datentransport

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
VLBI-Datentransport	Reduzierung der Latenzzeit für Intensive-Messungen zur Bestimmung der Rotationsphase der Erde (UT1-UTC) Korrelation von Netzwerkmessungen zur Bestimmung des vollständigen Satzes der Erdrotationsparameter	Erhöhung der Kapazität des Anschlusses des GO Wettzell an das weltweite Datennetz auf 1 GB/s
VLBI-Datentransport	Steigerung der Zuverlässigkeit des echtzeitnahen Datentransfers und Reduktion der menschlichen Interaktion beim eTransfer	Steigerung des Datenvolumens für die Zwischenspeicherung am Korrelator mittels eines RAID-Systems Entwicklung und Implementierung von Routinen für Start, Überwachung, Fehlerbehandlung bzw. Neustart des eTransfers in einem automatischen Modus

Datenhaltung und Informationsgewinnung

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Datenmodellierung	Integrierte Datenhaltung	Weiterentwicklung neuartiger Datenmodelle und benutzerfreundlicher Schnittstellen, einheitlich für alle Datentypen
IERS-Datenhaltung	Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit und Vergrößerung des Nutzerkreises für das IERS-Daten- und Informationssystem	Ausbau des interaktiven Datenanalysetools Unterstützung durch leistungsfähige Plotsoftware Entwicklung der Methodik zur Speicherung und Bearbeitung von Zeitreihen (Pilotprojekt)
IERS-Datenhaltung	Erweiterung des Datenbestands im Bereich der geophysikalischen Fluide	Erstellung der erforderlichen XML Schemata automatische Erfassung der Metadaten
GGOS Portal	Multifunktionaler Einstiegspunkt für die Projekte GGOS/GEOSS	Entwurf der Architektur Aufbau und Betrieb der Registratur Einbindung der IAG Dienste Erfassung der internen und externen Nutzeranforderungen Einbindung von Web-Services aus dem IERS Daten- und Informationszentrum

FGS Methodenbank	Verknüpfung der geodätisch-geophysikalischen Zeitreihen mit Modellen der Erdrotation	Erstellung eines Erdrotationssimulationstools Verknüpfung mit Astrotoolbox
Internationale Datenbank für Absolut-schweremessungen – AGrav	Beitrag zur Realisierung eines neuen internationalen Schwerereferenz-Systems	Weiterentwicklung der Datenbank im Rahmen der Working Group for Absolute Gravity (WGAG)
Metadatenkatalog	Erschließung der geodätischen Datensätze für Web Catalog Services der verschiedenen Observingsystems	Erstellung eines ISO konformen Metadatenkatalogs für GGOS Aufbau und Betrieb eines Clearinghouses für GGOS für die Interoperabilität von Metadaten / Daten Aufbau und Betrieb eines Web Catalog Service, Einbindung in GEOSS

Pilotprojekte

Thema	Projekt
Darstellung von Zeitreihen	Entwicklung der Methodik zur effizienten Speicherung von geodätischen Zeitreihen auf Rechnern, welche eine Optimierung der Zugriffe auf die Zeitreihen ermöglicht. Entwicklung von Verfahren, welche Metainformationen über diese Zeitreihen erfassen und die Suche von Datensätzen unterstützen.

4 Methodische Grundlagen und Verfahren

In Hinblick auf die von GGOS gesteckten Ziele sind die Anstrengungen für eine konsistente Kombination der geodätischen Messverfahren weiterzuführen. Ziel ist, Kombinationsstrategien zu entwickeln, welche die Stärken der unterschiedlichen Techniken optimal nutzen. Weitere Untersuchungen erfordert die Problematik der Verbindungsmessungen ("local ties") zwischen den geometrischen Raumverfahren. In die Studien einbezogen werden sollen dabei auch Verbindungsmessungen im Raum, welche z.B. VLBI-Beobachtungen von GNSS-Satelliten oder zukünftige Satellitenmissionen liefern können. Fehlereinflüsse auf die gesamten Messvorgänge sollen weiter untersucht und die physikalische Modellierung sowohl der Beobachtungen als auch der Hintergrundmodelle verbessert werden. Die aus der FGS in den Antrag für eine DFG Forschergruppe Referenzsysteme eingebrachten Ideenskizzen zeigen den Arbeitsrahmen auf. Die skizzierten Themen beinhalten die Entwicklung konsistenter terrestrischer und zälestischer Referenzrahmen beruhend auf verbesserter Modellierung und Kombinationsstrategie, die Entwicklung optimierter Methoden zur Verwendung von Verbindungsmessungen auf der Erde und im Raum sowie die Realisierung eines dynamischen Bezugssystems, welches die Stärken der verfügbaren Satellitensysteme optimal nutzt.

Ausgehend von den vorliegenden Erfahrungen bei der Kombination verschiedener Messverfahren zur Realisierung des terrestrischen Referenzsystems ist die Methodik zur Kombination von Messungen auf Beobachtungsebene weiterzuentwickeln und in die praktische Nutzung einzuführen. Hierzu soll eine erweiterte Version der Bernese GPS Software verwendet werden, welche die Kombination von GNSS, SLR und VLBI auf Beobachtungsebene erlaubt. In Hinblick auf die zukünftigen neuen Navigationssatellitensysteme sollen Methoden entwickelt werden, welche die neuen Signale und die stabileren Uhren optimal nutzen. Die Möglichkeit zur Reprozessierung großer Mengen an Beobachtungsdaten ist zentral für viele der geplanten Forschungsthemen.

Parallel werden die Entwicklungen für echtzeitnahe Auswertungen vorangetrieben. Zum Einen bietet sich die Weiterentwicklung von Komponenten der Bernese GPS Software an, zum Anderen kann dies durch die Entwicklung und Weiterentwicklung von spezieller Echtzeitauswertesoftware erreicht werden. Damit wird zum Beispiel die Bestimmung von Satellitenuhr- und -bahnkorrektionsdaten, „differential code biases“, Ionosphärenparametern, Troposphärenwerten möglich oder verbessert. Die Bereitstellung dieser Produkte geht einher mit der Entwicklung neuer Standards zu deren effizienter Verbreitung via RTCM.

Untersuchungen zum Rotationsverhalten der Erde stehen weiterhin im Fokus der FGS. Die FGS beteiligt sich mit mehreren Teilprojekten an der DFG Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse". Die Fragestellungen beinhalten die Integration von Erdrotation, Schwerfeld und Geometrie mittels raumgeodätischer Verfahren, der Analyse von Anregungsmechanismen der Polbewegung und dem Einbezug der Beobachtungen des Großringlasers des Geodätischen Observatoriums Wettzell. Studiert werden sollen die Korrelationen zwischen zeitlich hochaufgelösten Polparameter und Nutationsparameter, die Stabilität der Orientierung der GNSS Bahnen sowie der Einfluss der unterschiedlichen Umlaufzeiten der Satelliten der verschiedenen GNSS.

Neben der fortgesetzten Unterstützung des Aufbaus eines Internationalen Altimetrie Services (IAS) soll im Bereich der Satellitenaltimetrie eine möglichst lange Zeitreihe präziser Altimetermessungen bereitgestellt und durch konsistente Kalibrierung und Kombination ein einheitlicher gesicherter Bezug zum Geozentrum erarbeitet werden. Es soll die Kinematik

des Meeresspiegels weiter analysiert und verbesserte globale Gezeitenmodelle abgeleitet werden. In Kombination mit Resultaten von GRACE und GOCE sollen hochauflösende Schwerefeldstrukturen bestimmt und Geoid und dynamische Ozeantopographie getrennt werden. Schließlich soll die Expertise für neue Sensor-Technologien wie delay Doppler, wide swath altimetry, GNSS Reflectometry aufgebaut und genutzt werden.

Der Satellit GOCE wurde am 17. März 2009 erfolgreich in seine Umlaufbahn gebracht. Die Verarbeitung seiner Daten und die Interpretation der abgeleiteten Resultate wird die nächste Berichtsperiode maßgeblich prägen. Dabei sind eine detaillierte Analyse aller Prozessierungsschritte der Verarbeitungskette und ein vertieftes Verständnis in Theorie und Anwendung der verschiedenen Sensoren von entscheidender Wichtigkeit. Dies schließt Beobachtungssysteme im Weltraum, auf Flugzeugen sowie auf der Erdoberfläche mit ein. Als Beitrag zur Realisierung einer GRACE-Folgemission werden neuartige Beobachtungskonzepte und entsprechende Simulationsprozesse entwickelt, die es erlauben, Aussagen über zukünftige Beobachtungs- und Missionsszenarien zu treffen. Zur Berechnung hochauflösender regionaler und globaler Schwerefeld- bzw. Geoidmodelle und zur Realisierung eines modernen globalen Höhenreferenzsystems werden Methoden und Modellansätze zur rigorosen Kombination von Schwerefeldbeobachtungen verschiedener Satellitenmissionen und terrestrischer Messungen weiterentwickelt. Durch regelmäßige Absolutschweremessungen und Beteiligung an Vergleichskampagnen der Absolutgravimeter trägt die FGS zur Realisierung eines globalen Schwerestandards und damit zum Aufbau eines konsistenten und langzeitstabilen globalen Schwerereferenzsystems bei. Schließlich beteiligt sich die FGS an der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes.

4.1 Geodätische Punktfelder

Stand der Forschung

Als Punktfeld bezeichnen wir die Menge aller Punkte, die auf einer Fläche, in der Geodäsie im Allgemeinen auf der Erdoberfläche, liegen. Mit raumgestützten Positionierungsverfahren, insbesondere mit SLR, GNSS und VLBI, können Punktfelder heute mit einer relativen dreidimensionalen Lagegenauigkeit im Bereich weniger Millimeter bestimmt werden. Dabei ist die horizontale Lage im Allgemeinen um den Faktor zwei bis drei besser als die radiale Komponente (Höhe). Da die Punktkoordinaten aus den Messungen nicht direkt schätzbar sind, werden eindeutig definierte und realisierte Referenzsysteme benötigt, auf die sich die Koordinaten beziehen. Aus Wiederholungsmessungen lassen sich dann zeitliche Änderungen der Punktkoordinaten ableiten, die heute bei kontinuierlich messenden Stationen als konstante Geschwindigkeiten angegeben werden und Genauigkeiten von einem Millimeter pro Jahr aufweisen. Ebenso wie bei den Koordinaten werden die horizontalen Geschwindigkeiten signifikant besser bestimmt als die radialen.

Die Genauigkeit der zeitabhängigen Koordinaten ist vor allem wegen systematischer Fehler der einzelnen Messverfahren, der Modellierung und Reduktion unregelmäßiger physikalischer Einflüsse sowie des eindeutigen Bezugs zum Referenzsystem begrenzt. So weisen z.B. die SLR-Messungen auf vielen Stationen instrumentell bedingte systematische Streckenfehler auf (z.B. "range bias"), die GPS-Messungen sind durch Fehler in der Bahnmodellierung (z.B. Strahlungsdruck) verfälscht, und bei VLBI-Messungen führen Deformationen der Teleskope zu Fehlern. Bei allen Verfahren verursachen physikalische Einflüsse, insbesondere der Atmosphäre und der Hydrosphäre, Fehler bei den Koordinatenbestimmungen. Das Referenzsystem wird bei den einzelnen Verfahren physikalisch unterschiedlich realisiert. SLR-Messungen erlauben wegen der direkten Streckenmessung zu Satelliten den unmittelbaren Bezug zu einem

geozentrischen System, GPS- und VLBI-Messungen müssen über (nahezu) identische Punkte mit fehlerbehafteten Koordinaten und Verbindungsmessungen in dieses transformiert werden. Die Längeneinheit Meter wird bei allen Verfahren durch unterschiedliche Reduktionen der Laufzeit elektromagnetischer Wellen in der Atmosphäre festgelegt.

Ein einheitliches terrestrisches Referenzsystem zur Bestimmung geodätischer Punktfelder wird durch einen Rahmen von Referenzstationen realisiert, deren Koordinaten durch Kombination der Messdaten der verschiedenen Verfahren berechnet werden. Die Methodik hat sich in den letzten fünf Jahren insofern geändert, als die Zeitabhängigkeit der Koordinaten nicht durch konstante Geschwindigkeiten der technikspezifischen Punkte auf den Stationen in die Kombination eingeführt wird, sondern es werden für jedes Verfahren (wöchentliche) Epochenkoordinaten berechnet und über lokale Verbindungsmessungen zu konstanten Geschwindigkeiten in einer gemeinsamen Ausgleichung zusammengeführt (Angermann et al., 2007). Die Orientierung der Koordinatenachsen wird durch simultane Ausgleichung der Erdorientierungsparameter (EOP) mit geschätzt. Die FGS ist maßgeblich beteiligt an der Vorbereitung eines DFG Antrages für eine Forschergruppe zu Referenzsystemen. Die ausgearbeiteten Projektskizzen werden in die folgenden Abschnitte eingebunden.

Die Forschung zur Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der zeitabhängigen Bestimmung geodätischer Punktfelder wird vor allem durch die Kommissionen und wissenschaftlichen Dienste der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) vorangetrieben. Dies sind insbesondere die Kommissionen 1 "Reference Systems" und 4 "Positioning and Applications" sowie der "International Earth Rotation and Reference Systems Service" (IERS), der "International GNSS Service" (IGS), der "International Laser Ranging Service" (ILRS), der "International VLBI Service for Geodesy and Astrometry" (IVS) und der "International DORIS Service" (IDS). Die FGS hat zu der Forschung durch intensive Mitarbeit in diesen Kommissionen und Diensten wesentlich mitgewirkt. Die wichtigsten Funktionen der letzten fünf Jahre sind im Kapitel 6 aufgeführt.

Innerhalb des IERS werden das zälestische und das terrestrische Referenzsystem von den beteiligten Produktzentren unabhängig voneinander als "International Celestial Reference Frame" (ICRF) und "International Terrestrial Reference Frame" (ITRF) bestimmt. Die FGS ist an diesen Arbeiten maßgeblich beteiligt: In der Funktion als ITRS Kombinationszentrum hat die FGS eine kombinierte Lösung für die neueste Realisierung des terrestrischen Referenzsystems, den ITRF2008, berechnet. Dazu wurden Zeitreihen von Stationskoordinaten und Erdorientierungsparametern der Raubeobachtungsverfahren VLBI, SLR, GPS und DORIS über einen langen Zeitraum (bis zu 28 Jahre) auf Normalgleichungsebene kombiniert. Die am DGFI verwendete Kombinationsmethodik ist in verschiedenen Publikationen dargestellt (z.B. Angermann et al., 2009, Seitz, 2009). Die FGS war auch an den Arbeiten zur Berechnung des ICRF2, der neuesten Realisierung des zälestischen Referenzsystems, beteiligt (Ma, et al., 2009).

Durch die getrennte Bestimmung des ITRF, ICRF und der beide Rahmen verbindenden Erdorientierungsparameter, wie es auf internationaler Ebene innerhalb des IERS und der verantwortlichen Produktzentren heute noch durchgeführt wird, entsteht eine Inkonsistenz, die keine gemeinsame Interpretation und Nutzung zulässt. Auf nationaler Ebene konnten z.B. durch die Arbeiten im GGOS-D Projekt, das im Rahmen des Geotechnologienprogramms von BMBF und DFG gefördert wurden (Rothacher et al., 2010) erhebliche methodische Fortschritte gegenüber dem internationalen Stand erzielt werden. An diesen Arbeiten war die FGS maßgeblich beteiligt. Wesentliche Ziele von GGOS-D waren die Generierung konsistenter und mit einheitlichen Standards und Modellen

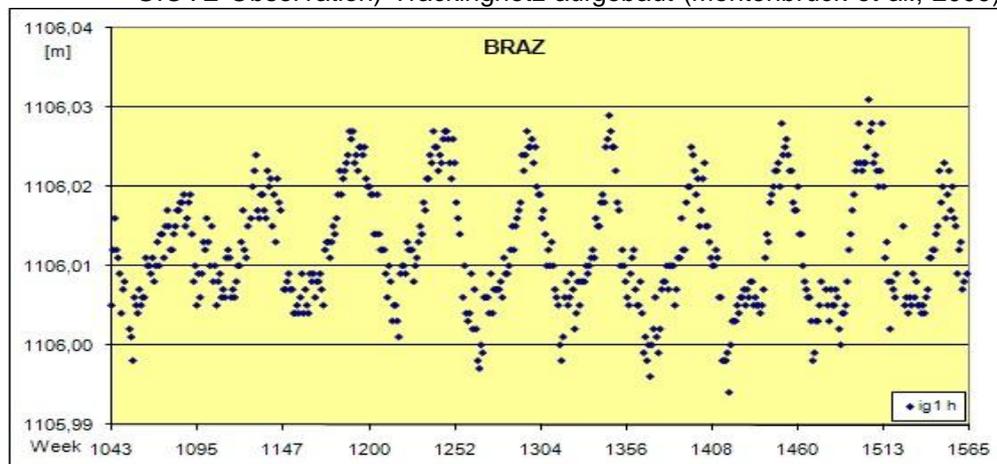
reprozessierter Beobachtungsreihen der geodätischen Raumverfahren, eine gemeinsame Bestimmung des terrestrischen und zälestischen Referenzrahmens, sowie die Berechnung konsistenter Zeitreihen geodätisch-geophysikalischer Parameter.

Eine wesentliche Unzulänglichkeit der gegenwärtigen Bestimmung geodätischer Punktfelder ist die Darstellung der Zeitabhängigkeit der Koordinaten. Es werden immer noch ausschließlich konstante Geschwindigkeiten der Punkte angenommen. Saisonale, episodische oder anomale Effekte werden nicht wiedergegeben. Dies hat zur Folge, dass bei Benutzung unterschiedlicher Referenzpunkte zu verschiedenen (Jahres-) Zeiten bei den Anschlusspunkten unterschiedliche Koordinaten erhalten werden (siehe Abbildung 4.1). Die daraus resultierenden Fehler liegen deutlich über der heutigen Messgenauigkeit.

Die Kinematik des ITRF bezieht sich auf ein geologisch-geophysikalisches Modell (NNR NUVEL-1A), das die ausgedehnten Deformationszonen der Erdoberfläche (z.B. die mediterranen und zirkumpazifischen Gürtel) nicht erfasst und mit der geforderten Genauigkeit nicht für die heutige Zeit gilt. Die FGS berechnet aktuelle Modelle der Plattenkinematik und Erdkrustendeformationen (APKIM) aus geodätisch beobachteten Punktbewegungen, die signifikante Abweichungen von den geophysikalischen Modellen zeigen (Drewes, 2009).

Validierung der GPS Satellitenbahnen mit SLR (Urschl et al, 2007) sowie die Analyse von Sprüngen der Orbits an den Tagesgrenzen zeigen, dass trotz der heute erreichten hohen Präzision der Bahnen signifikante Modellierungsdefizite bestehen. Perioden, welche mit bahnspezifischen Perioden im Zusammenhang stehen, finden sich auch in der mit GPS bestimmten scheinbaren Bewegung des Bezugspunktes des terrestrischen Referenzsystems sowie in den Zeitserien der Stationskoordinaten (Ray et al., 2008). Neben Defiziten in der Bahnmodellierung stehen auch Aliasingeffekte von Mehrwegeinflüssen zur Diskussion (King and Watson, 2010). Nur zum Teil können die beobachteten durch unmodellerte Albedostrahlung der Erde und den Rückstoß infolge der Mikrowellenausstrahlung erklärt werden (Ziebart et al., 2005). Innerhalb der FGS wurden Albedomodelle zur Untersuchung der Störeffekte entwickelt (Rodriguez et al., 2009).

Gegenwärtig fliegen zwei Galileo-Testsatelliten um die Erde und senden Signale auf Galileo-spezifischen Frequenzen aus. Mittlerweile sind auch entsprechende Empfänger und Antennen verschiedener Hersteller auf dem Markt verfügbar. Das DLR (Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum) und das BKG haben gemeinsam das CONGO (COoperative Network for GIOVE Observation) Trackingnetz aufgebaut (Montenbruck et al., 2009),



ein globales Echtzeit-Empfängernetz, welches Anfang 2010 aus insge-

Abbildung 4.1: Saisonale Höhenänderungen der Station Brasilia von bis zu 3 cm.

samt zehn Stationen bestand (Abbildung 4.2). Seit Anfang 2009 werden die Daten der Trackingstationen unter Verwendung des am BKG entwickelten NTRIP-Protokoll über einen Broadcaster beim BKG in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Die Datenströme werden am IAPG empfangen und archiviert. Routinemäßig werden aus den Daten täglich Bahnen der beiden GIOVE Satelliten im Dezimeterbereich berechnet (Steigenberger et al., 2010), um mit der Datenqualität und den spezifischen Problemen der Kombination von GPS und Galileo vertraut zu werden und die Güte des Wasserstoffmasers an Bord von GIOVE-B zu untersuchen (siehe auch Abschnitt 1.4).

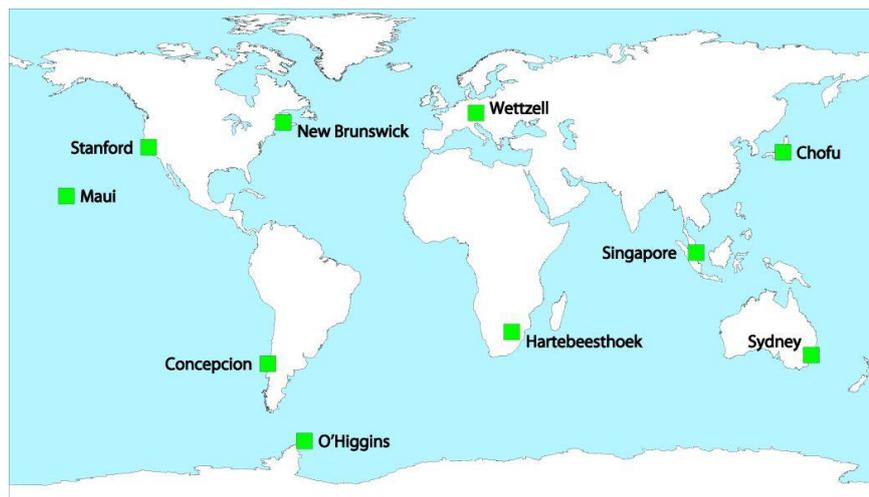


Abbildung 4.2: CONGO Echtzeitnetz, betrieben von DLR und BKG (Montenbruck et al., 2009)

Referenzsysteme

Die Referenzsysteme bilden die Grundlage der Arbeiten zur Positionierung, Navigation, Raumfahrt und für die Erdsystemforschung und damit einen Schwerpunkt der Arbeiten der FGS. Die verschiedenen geodätischen Raubeobachtungsverfahren (VLBI, SLR/LLR, GPS, DORIS) weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen für die Realisierung der Referenzsysteme auf. Die Eingangsdaten müssen deshalb auf ihre Zuverlässigkeit für die Bestimmung der Datumparameter (Koordinatenursprung, Orientierung und Maßstab) untersucht und mit geeigneten Algorithmen zur Datumsfestlegung genutzt werden. Ziel ist es, die Methodik der Kombination der Beobachtungsverfahren weiter zu verbessern um die jeweiligen Stärken der unterschiedlichen Techniken optimal zu nutzen und die Schwächen zu eliminieren. Der Einfluss der Netzgeometrie ist dabei in die Untersuchungen einzubeziehen.

Da die Ergebnisse aus den einzelnen Beobachtungsverfahren unterschiedliche Datumsdefekte aufweisen, müssen zur Realisierung des terrestrischen Referenzsystems geeignete Datumsbedingungen eingeführt werden. Dies betrifft die Festlegungen des Koordinatenursprungs im Geozentrum, der Orientierung relativ zur Rotations- bzw. Hauptträgheitsachse und des Maßstabs. Zu untersuchen ist dabei auch der Einfluss der Stationsverteilung und der Gewichtung der einzelnen Verfahren. Einen wesentlichen Beitrag zur kinematischen Datumsfestlegung sollen aus geodätischen Beobachtungen abgeleitete aktuelle Modelle der Plattenkinematik und Erdkrustendeformationen (APKIM) liefern. Insgesamt soll bei der Datumsfestlegung bestmögliche Konsistenz zwischen TRF, EOPs, CRF und dem Erdschwerefeld (niedere harmonische Koeffizienten) erzielt werden.

Hierzu soll auch das Potential des Einschusses von tieffliegenden und mit GNSS-Empfängern ausgestatteten Satelliten untersucht werden. Da

tieffliegende Satelliten eine andere Sensitivität aufweisen auf Lage und Orientierung des Erdschwerefeldes und die Beobachtungsgrößen unbeeinflusst durch troposphärische Refraktionseffekte sind, kann eine verbesserte Realisierung des durch GNSS alleine realisierten dynamischen Bezugssystems erwartet werden. Voraussetzung ist aber, dass die physikalischen Bahnmodelle für die hoch- wie für die tieffliegenden Satelliten verbessert werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch das Studium des Einflusses präziser Distanzmessungen zwischen Satelliten eines zukünftigen GNSS Systems auf die Realisierung des dynamischen Satellitenbezugssystems. Entsprechende Themen sind als Projektskizze in den Bündelantrag zur geplanten DFG-Forschergruppe Referenzsysteme integriert worden.

Um die Konsistenz der Kombinationsergebnisse zu verbessern, soll eine rigorose Kombination von verschiedenen Parametern (z.B. Stationspositionen, -geschwindigkeiten und Erdorientierungsparameter) und die gemeinsame Schätzung der Referenzsysteme (zälestisch und terrestrisch) durchgeführt werden. Voraussetzung dafür ist die Verwendung identischer Konstanten und Modelle bei der Prozessierung der Messdaten der einzelnen Beobachtungsverfahren und eine nicht verzerrende Auswertemethode. Die bei der Berechnung des terrestrischen Referenzrahmens (ITRF) immer noch übliche Transformation von ausgeglichenen Stationskoordinaten soll durch die Akkumulation der originären Beobachtungsgleichungen oder von datumsfreien (singulären) Normalgleichungen ersetzt werden. Die optimale Kombination der Normalgleichungen (Skalierung, Gewichtung durch Kovarianzkomponentenschätzung, Datumsfestlegung) wird weiter erforscht.

Ein weiterer Schritt zur Genauigkeitssteigerung der Ergebnisse ist die verbesserte Parametrisierung der zeitabhängigen Stationspositionen. Dazu sollen zunächst periodische Variationen der Stationen geschätzt und als kinematische Parameter der zeitabhängigen Koordinaten der Referenzstationen mitgeliefert werden. Dies ist besonders wichtig bei der Verwendung der Referenzsysteme mit kurzen Beobachtungszeiten, in denen sich periodische Bewegungen nicht durch lineare Geschwindigkeiten approximieren lassen. In einem zweiten Schritt sollen physikalische Modelle (z.B. Auflasten) so parametrisiert werden, dass verbesserte Parameter geschätzt werden können (z.B. Elastizitätsmodul). Auch mit dem Thema der konsistenten Realisierung der Bezugssysteme durch verbesserte Modellierung und Kombination ist die FGS mit einer Projektskizze im Bündelantrag Forschergruppe Referenzsysteme vertreten.

Von grundlegender Bedeutung für die Berechnung eines terrestrischen Referenzsystems ist die Verknüpfung der (globalen) Netze der verschiedenen Verfahren. Dies ist heute nur mit Hilfe von lokalen terrestrischen Verbindungsmessungen ("local ties") zwischen direkt benachbarten Instrumenten verschiedener Techniken auf Ko-lokationsstationen möglich. Es sollen Strategien zur Auswahl geeigneter Stationen zur Verknüpfung der Verfahren entwickelt sowie der Einfluss eventueller Fehler in den terrestrischen Messungen auf die kombinierten Parameter abgeschätzt und Möglichkeiten zu ihrer Elimination untersucht werden. Die Mitarbeit der FGS in der "IGS Antenna Working Group" und in der IERS Working Group on Site Survey and Co-location ergibt sich aus diesen Aktivitäten. Alternative Möglichkeiten zur Verknüpfung der Systeme bieten sich über Ko-lokation der verschiedenen Techniken auf Satelliten oder auf dem Mond. Das Potential solcher Verbindungsmessungen im Raum soll bearbeitet werden. Eine FGS Projektskizze zu diesem Thema ist in den Bündelantrag Forschergruppe Referenzsysteme integriert.

Eine Verknüpfung der Sensorsysteme an Referenzstationen lässt sich neben terrestrischen Verbindungsmessungen auch über eine Kombination gemeinsamer Parameter erzielen. Innerhalb der FGS sind mit neuen

Erweiterungen der Bernese GPS Software die Voraussetzungen geschaffen, das Potential einer Kombination auf Beobachtungsstufe zur Realisierung eines konsistenten Referenzsystems zu untersuchen. Neben einer einheitlichen Modellierung und Parametrisierung ist neben der Kombination von Troposphärenparametern kollozierter Messsysteme auch die Kombination von Uhrkorrekturparameter für die Einwegverfahren möglich. Besondere Beachtung verdient dabei die gemeinsame Verarbeitung von GNSS und VLBI-Beobachtungen. Die FGS beteiligt sich im Rahmen dieser Thematik an der "IERS Working Group on Combination at the Observation level" (COL) und hat eine Projektskizze in den Bündelantrag Forschergruppe Referenzsysteme integriert.

Schließlich wird die FGS auch eine Strategie zur Nutzung des neuen europäischen Navigationssystems Galileo zur Realisierung des terrestrischen Referenzsystems und zu dessen geodätischer Sicherung für die Zukunft erarbeiten. Es ist vor allem der zusätzliche Nutzen durch die Einbeziehung der Beobachtungsdaten des neuen Systems sowie ein Einfluss der unterschiedlichen Umlaufzeit der Satelliten zu untersuchen. Dazu sollen Simulationsstudien durchgeführt werden mit dem Ziel, eine optimale Konfiguration der auszuwählenden Daten aus der überaus großen Anzahl der Messungen zu ermitteln.

Präzise Punktpositionierung

Generelles Forschungsziel ist einerseits die hochpräzise zeitabhängige Bestimmung geodätischer Punktfelder über lange Zeiträume, zum anderen die echtzeitnahe Positionierung in einem global einheitlichen Referenzsystem. Die langfristigen Arbeiten dienen vor allem der Erforschung des globalen Wandels durch klimatische und anthropogene Einflüsse sowie der Geodynamik durch geophysikalische Prozesse. Die echtzeitnahe Positionierung dient der präzisen Navigation und dem Aufbau von Frühwarnsystemen zum Erkennen von Naturgefahren.

Bei der präzisen Punktpositionierung müssen sämtliche Komponenten der Auswerteverfahren grundlegend überprüft und verbessert werden. Dies betrifft die Untersuchung aller Einflüsse auf den gesamten Messvorgang, die physikalischen Modelle zur Reduktion der Messungen und zur Parametrisierung, die benutzten Konstanten, Standards und Konventionen zur Datenverarbeitung, die mathematischen Algorithmen und die Darstellungsformen. Erforderlich ist auch ein vertieftes Studium des Einflusses von korreliertem Rauschen von GNSS Beobachtungen auf die Fehlermaße von Positions- und Geschwindigkeitsschätzungen mit dem Ziel einer realistischeren Fehlerabschätzung. Es ist zudem heute ein Genauigkeitslevel erreicht, der eine Verbesserung der gegenwärtig verwendeten empirischen GNSS Bahnmodelle nötig macht. Zudem müssen Strahlungsdruckmodelle hoher Qualität für die Galileo-Satelliten und die neuen GPS-Blocktyps entwickelt werden. In einer verbesserten physikalischen Bahnmodellierung dürfte auch der Schlüssel zum Verständnis der in verschiedenen GNSS-basierten Zeitserien auftauchenden anomalen drakonitischen Perioden zu finden sein.

Bei den physikalischen Modellen sind vor allem die Ionosphäre und die Troposphäre sowie die atmosphärischen und ozeanischen Auflasten zu untersuchen. Für geodätische Anwendungen wird heute i.A. die ionosphärenfreie Linearkombination verwendet. Gute Ionosphärenmodelle sind jedoch erforderlich zum Fixieren der Mehrdeutigkeiten sowie zur Modellierung der ionosphärischen Korrekturen höherer Ordnung. In Hinblick auf das größere Rauschen der ionosphärenfreien Linearkombination ist zu untersuchen, ob die Verwendung dieser Linearkombination noch zeitgemäß ist oder ob, basierend auf einem guten Ionosphärenmodell, das Schätzen stochastischer Ionosphärenparameter unter Verwendung einer realistischen raum-zeitlichen Korrelation der Parameter die Resultate weiter verbessert.

Die derzeitigen Modellierungsverfahren für die Troposphäre genügen nicht den hohen Anforderungen für eine präzise Positionierung. Insbesondere die Schätzung der Höhenkomponente ist sehr stark mit der Troposphäre korreliert und wird von Modellfehlern verfälscht. Es müssen verfeinerte Modelle erarbeitet und mit Beobachtungen der verschiedenen Messverfahren (insbesondere GPS und VLBI) erprobt werden. Für die atmosphärischen Auflasten gibt es noch keine hinreichend guten Erkenntnisse. Insbesondere die regionalen Unterschiede (z.B. an den Rändern und im Innern der Kontinente, in geologisch verschiedenen Erdkrustentypen, welche die Elastizitätsparameter beeinflussen) müssen weiter untersucht werden. Die Ergebnisse sind wegen der kurzfristigen Deformationen insbesondere für kurze oder Echtzeit-Beobachtungen wichtig und liefern auch Informationen für die Geophysik (Elastizität der Erdkruste).

Ein Schwerpunkt wird die Einbeziehung neuer Beobachtungsgrößen, z.B. des europäischen Navigationssystems Galileo sein. Eine Herausforderung stellt die korrekte Behandlung von satelliten- und empfängerspezifischen Biases sowie Biases zwischen GPS und Galileo einerseits sowie die Implementation neuer Algorithmen zur Mehrdeutigkeitslösung bei Beobachtungen auf drei Frequenzen dar. Es sollen zudem Algorithmen zur Lösung von Mehrdeutigkeiten für undifferenzierte Beobachtungsdaten entwickelt werden.

Viele der zu untersuchenden Modellverbesserungen machen die Analyse von großen GNSS-Datenmengen erforderlich. So können beispielsweise die drakonitischen Orbitfrequenzen in den Stationskoordinaten erst in Zeitserien einer Länge von rund 10 Jahren eindeutig identifiziert werden. Modellverbesserungen zur Elimination dieser Effekte können damit nur überprüft werden durch Verarbeitung großer Datenmengen des globalen IGS Netzes. Sowohl die Rechenleistung als auch die für eine effiziente Verarbeitung und Qualitätskontrolle nötigen Automatisierungsprozeduren stehen innerhalb der FGS zur Verfügung und wurden bereits für mehrere Rechendurchläufe verwendet (Steigenberger et al., 2009). Geplant sind innerhalb eines DFG-Projektes mit der TU Dresden, der ETH Zürich und dem AIUB in Bern auch Reprozessierungsläufe zur Berechnung von GLONASS-Bahnen und von Satellitenuhrkorrekturen. Letztere dienen zur Unterstützung von Verdichtungslösungen beispielsweise zur konsistenten Berechnung von atmosphärischem Wasserdampf für lange Zeiträume in die Vergangenheit.

Modellierung von Uhrenparametern

Alle geometrischen Raumverfahren beruhen auf dem Prinzip der Laufzeitmessung von elektromagnetischen Signalen, mithin auf der Messung von Zeitintervallen. Stabile Uhren spielen damit bei allen Verfahren eine grundlegende Rolle. Bei Zweiwegverfahren (SLR, PRARE) wird die Zweiweglaufzeit eines Signals mithilfe eines Zeitintervallzählers mit hoher Kurzzeitstabilität gemessen. Bei Einwegverfahren wie GNSS, VLBI, DORIS, aber auch Laser-Transpondermessungen wird die Signallaufzeit mithilfe von zwei verschiedenen Uhren gemessen. Synchronisation dieser beiden Uhren ist damit wesentlicher und integraler Bestandteil jeder Bestimmung geodätischer Messgrößen wie Stationskoordinaten.

Bei VLBI, DORIS, Laser-Transponder stehen pro Messepoche nicht genügend Beobachtungen zur Verfügung, als dass eine epochenweise Synchronisation der an der Messung beteiligten Uhren möglich wäre. Modellierung der Uhren ist damit zwingend erforderlich. Die Stabilität der Uhren definiert damit wesentlich die Messgenauigkeit dieser Verfahren.

Satelliten navigationsverfahren, auf der anderen Seite, stellen pro Beobachtungsepoche genügend Satelliten zur Verfügung, so dass eine epochenweise Uhrensynchronisation möglich ist. Für geodätische Anwen-

dungen werden die Uhrparameter üblicherweise entweder explizit epochenweise geschätzt oder epochenweise reduziert durch Doppeldifferenzbildung der Messungen eines Beobachtungsnetzes. Dies heißt, dass auf die Stabilität der Uhr nicht zurückgegriffen wird, die Messgenauigkeit ist im Wesentlichen unabhängig von der Qualität der verwendeten Uhren. Dies ist berechtigt für die Uhren, welche gegenwärtig in den Navigationssatelliten verwendet werden: Die Kurzzeitstabilität der Atomuhren erlaubt keine Modellierung der Satellitenuhrparameter auf dem Genauigkeitsniveau der Phasenmessgenauigkeit. Bei den passiven Wasserstoffmasern, welche die Galileo-Satelliten mitführen werden, könnte dies aber anders werden.

Experimente mit Daten von GIOVE-B aus dem CONGO-Echtzeit-Beobachtungsnetz, welches von BKG und DLR betrieben wird (Montenbruck et al., 2009), zeigen die sehr gute Qualität der Satellitenuhr (Abbildung 4.3). Es ist zu untersuchen, ob die Modellierung der Satellitenuhren zu einem Gewinn in der Positionierung führen. Hierzu müssen unterschiedliche Modellierungsansätze erprobt werden.

Interessant ist der Einfluss der Modellierung der Satellitenuhren auf die Bahnbestimmung. Insbesondere bei schwachen Beobachtungsnetzen helfen stabile Uhren der präzisen Bestimmung der Bahnen. Bei der Bahnprädiktion drehen sich die Verhältnisse gegenüber heute um: Während heute die Satellitenuhren wesentlich schlechter prädiziert werden können als die Bahnen, könnte dies in Zukunft umgekehrt sein (Hugentobler et al., 2009).

Werden hochstabile Satellitenuhren modelliert, so müssen relativistische Effekte korrekter modelliert werden. Heute beruht die periodische relativistische Korrektur der Satellitenuhren auf einer Keplerschen Näherung der Satellitenbahn. Für hochstabile Uhren genügt dies nicht mehr. Viel-

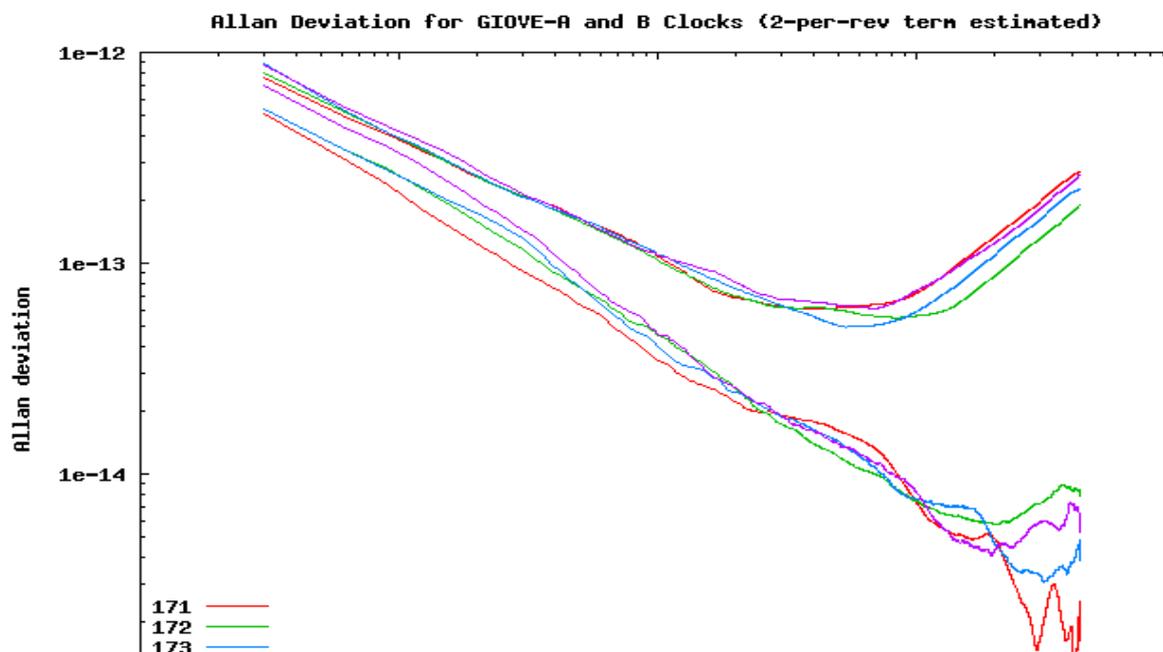


Abbildung 4.3: Allan Variance der Uhren von GIOVE-A (oben) und GIOVE-B (unten) für mehrere Tage in 2009 zeigen die exzellenten Leistungsmerkmale des passiven Wasserstoffmasers an Bord von GIOVE-B. Die Resultate wurden mit Daten aus dem CONGO Trackingnet

mehr – wie Experimente mit GIOVE-B bereits gezeigt haben – muss mindestens die Korrektur infolge Abplattung der Erde berücksichtigt werden. Es wäre ein Vorteil, mit der Integration der Bahn des Satelliten auch die Eigenzeit der Satellitenuhr mit zu integrieren. Damit wären auch Potentialvariationen berücksichtigt, welche z.B. von Gezeiten herrühren.

Erste Experimente haben in diesem Zusammenhang gezeigt, dass die übliche Doppelpräzisions-Rechengenauigkeit hierzu nicht mehr genügt.

Für VLBI werden Wasserstoffmaser als kurzzeitstabile Frequenzbasis verwendet. Die Maser der beteiligten Messstationen müssen mithilfe der Quasarbeobachtungen synchronisiert werden. Hierzu werden die Maser heute typischerweise als Polynom zweiten Grades, als stückweise lineare Funktion oder als stochastischer Prozess modelliert. Kombination mit GNSS auf Beobachtungsebene erlaubt die direkte Synchronisation der Maser mithilfe von GNSS-Phasenbeobachtungen. Es soll untersucht werden, inwieweit eine solche Kombination die VLBI-Resultate verbessert.

Echtzeitnahe GNSS-Datenanalyse

Die differentiellen Ansätze für Echtzeitpositionierung in cm-Genauigkeit funktionieren nicht mehr umfassend, sobald neben GPS und GLONASS eine größere Anzahl weiterer Systeme auftaucht (z.B. Galileo, Compass, etc.). Es wird massive Bandbreitenprobleme geben wegen der Unmenge neuer Beobachtungen, die bei differentiellen Ansätzen zu transportieren sind. Als Konsequenz sind einerseits die alten „Observation Space Representation“ (OSR) Algorithmen durch „State Space Representation“ (SSR) Algorithmen zu ersetzen, andererseits die Datenströme unter Beteiligung aller möglichen Lieferanten von Echtzeitbeobachtungen so zu standardisieren, dass Firmen die Technik aufgreifen und in kommerziell verwertbare Produkte überführen können.

Die Ziele im Einzelnen:

- Beteiligung an den Arbeiten der IGS-Community zur Schätzung von Bahnen und Uhren aus globalem IGS-Netz sowohl auf der Seite der Produzenten als auch auf der Seite der Nutzer der Produkte. Die Arbeiten werden im RTIGS-Projekt koordiniert. Beginn der Arbeiten zur Schätzung und zum Streamen von Ionosphärenparametern und „Differential Code Biases“.
- Beteiligung an den Arbeiten der EUREF-Community zur Schätzung von Troposphärenparametern unter Einbeziehung des GREF-Netzes. Das IGS-Netz ist nicht dicht genug, um die erforderliche räumliche Auflösung zu gewährleisten.
- Beteiligung lokaler RTK-Netze wie SAPOS um letztlich durch Zusatzinformationen aus hochauflösenden Netzen cm-Genauigkeiten lokal zu ermöglichen.
- Entwicklung von Provider-Systemen, die die Beiträge der verschiedenen Netze (Beispiel: IGS/EUREF/GREF/SAPOS) zu Korrekturdatenströmen zusammenfassen.
- Standardisierung im Rahmen von RTCM um kommerzielle Produkte erstellen zu können. Parallel dazu (ohne Gewährleistung, auf IGS/EUREF Niveau) ähnliche Produkte frei zugänglich für jeden.

Forschungsziele

Die Strategien zur rigorosen Kombination der Raumverfahren sind weiterzuentwickeln mit dem Ziel, die bestmögliche Konsistenz zwischen terrestrischen und zälestischen Referenzsystemen, Erdrotationsparametern und Schwerfeld zu erzielen. Unerlässlich hierzu sind Untersuchungen zu optimalen Datumsbedingungen und zum Einfluss der Netzgeometrie, aber auch die Entwicklung optimaler Strategien zur Verwendung von Verknüpfungsvektoren sowie der Einschluss niedriger Terme des Erdschwerfeldes in den Parametersatz der satellitenbasierten Lösungen. Als alternative Möglichkeiten zur Verknüpfung der technikspezifischen Bezugssysteme soll das Potential von Verknüpfungen auf Satelliten und dem Mond studiert werden. In Hinblick auf zukünftige Realisierungen des terrestrischen Bezugssystems werden Konzepte zur Berücksichtigung

zeitabhängiger nichtlinearer Stationsbewegungen studiert. Die Methodik zur Kombination der Verfahren auf Beobachtungsstufe soll weiterentwickelt und in die praktische Nutzung eingeführt werden. Das Potential der Verknüpfung von Uhrenparametern soll untersucht werden.

Als Grundlage zur Bereitstellung hochpräziser zeitabhängiger Punktpositionen über lange Zeiträume ist die weitere Untersuchung aller Fehlereinflüsse auf die gesamten Messvorgänge der verschiedenen Verfahren erforderlich, d.h., der physikalischen Korrekturmodelle, der Parametrisierung, der mathematischen Algorithmen sowie der Konstanten, Standards und Konventionen. Die Analyse des korrelierten Rauschens in Koordinatenzeitserien soll eine realistische Fehlerabschätzung für Geschwindigkeitsschätzungen ermöglichen. Verbesserung der dynamischen GNSS Bahnmodellierung soll dazu beitragen, die in geodätischen Zeitreihen festgestellten Variationen mit bahntypischen Perioden zu reduzieren. Für Untersuchungen, welche auf langen Zeitreihen beruhen, wird die Möglichkeit zur Analyse großer Datenmengen herangezogen.

Die Integration neuer Navigationssysteme, insbesondere von Galileo, und deren geodätische Nutzung wird einen der Schwerpunkte der neuen Berichtsperiode bilden. Es sollen neue Algorithmen zur optimalen Nutzung der neuen Frequenzen und Signale implementiert und das Potential hochstabiler Uhren und der Modellierung von Uhren für die Satellitennavigation erarbeitet werden. Der Einfluss der neuen Systeme und der Modernisierung der bestehenden Trackingnetze auf die Realisierung der Referenzsysteme soll studiert werden. Mit Untersuchungen soll das Potential neuartiger Messgrößen wie präziser Zwischensatellitenmessungen für zukünftige Satellitensysteme untersucht werden. Echtzeitnahe Positionierung erfordert die Standardisierung der Datenströme im Rahmen von RTCM und die Entwicklung neuer Algorithmen. Ziel ist, die Datenqualität der GNSS-Stationen in Echtzeit zu monitoren.

4.2 Orientierung und Rotation der Erde

Untersuchungen zum Rotationsverhalten der Erde stehen auch weiterhin im Fokus der FGS, da die Erdrotation kontinuierlich überwacht werden muss und dabei noch viele wissenschaftliche Fragen auf ihre Beantwortung warten. Auch aus diesem Grund beteiligt sich die FGS sehr intensiv an den weltraum-geodätischen Beobachtungsverfahren. Damit einhergehen Analyse und Interpretation der Ergebnisse; eine Thematik, die schon immer sehr intensiv von den an der FGS beteiligten Institutionen bearbeitet wurde. In den letzten Jahren haben diese Arbeiten noch einmal eine deutliche Zunahme erfahren, da die DFG die Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse" (FOR 584) fördert, an der auch Mitglieder der FGS einen maßgeblichen Anteil haben.

Stand der Forschung

Obwohl die Lage des terrestrischen Systems im zälestischen System zu jeder Zeit durch drei Winkel eindeutig beschrieben werden kann, wird die historisch gewachsene Trennung der Erdorientierungsparameter in Präzession und Nutation einerseits und Polbewegung (x_p , y_p) andererseits auch weiterhin beibehalten. Dies liegt in der Hauptsache daran, dass daraus ein direkter praktischer Nutzen für geophysikalische Interpretationen gezogen werden kann.

In den letzten Jahren hat die Modellierung der Erdrotation eine einschneidende Veränderung dadurch erlebt, dass für die Parametrisierung der Präzession und der Nutation nicht mehr das dynamische Frühlingsäquinoktium sondern die Positionen von Quasaren und Radiogalaxien im ICRF als Realisierung des Bezugs zum inertialen Raum angenommen werden. Neben einer eher langfristig wirkenden Genauigkeitssteigerung wird vielmehr eine Vereinfachung der Darstellung und der Zusammen-

hänge, insbesondere bei der Rotationsphase der Erde, erreicht. Augenfälligstes Merkmal für diese Umstellung ist, dass Zuschläge zu Nutationsmodellen nun nicht mehr in $d\psi$ und $d\epsilon$ (Nutation in Länge und Schiefe) sondern in dX und dY angegeben werden.

Die gängigen weltraum-geodätischen Beobachtungsverfahren (VLBI, SLR, LLR, GPS und DORIS) zeichnen sich einerseits durch spezifische Vorteile aus, sind andererseits aber auch mit Einschränkungen behaftet (Tabelle 4.1). Alle Verfahren haben gemein, dass dx_p/dt , dyp/dt und dX/dt , dY/dt nicht ohne Einschränkungen trennbar sind, da die Parameterschätzung in diesem Fall singular wird. Aus diesem Grund werden in Standardauswertungen keine zeitlichen Ableitungen der Nutationswinkel geschätzt. Das Gleiche gilt auch, wenn Polbewegung und UT1-UTC mit einer höheren zeitlichen Auflösung als einem vollen Tag geschätzt werden sollen. In diesem Fall muss die Nutation auf die a priori-Werte fixiert oder mit Pseudobeobachtungen gestützt (constrained) werden (Thaller et al. 2008).

Die Bestimmung von sub-täglichen Erdrotationsschwankungen ist auf die Verfahren VLBI und GNSS beschränkt, da nur diese beiden über eine ausreichende Sensitivität verfügen. Allerdings ist eine höhere Auflösung von UT1-UTC bei VLBI sehr stark von der Zahl der Beobachtungsstationen und von der Ausdehnung des Stationsnetzes abhängig.

Tabelle 4.1: Weltraumgeodätische Messverfahren mit ihren Vor- und Nachteilen bezüglich der Erdorientierungsbestimmung

	Messbare Erdorientierungsparameter	Vorteile	Nachteile
VLBI	$x_p, y_p, UT1-UTC, dX, dY, dx_p/dt, dy_p/dt, LOD, dX/dt, dY/dt$	alle EOP schätzbar (ohne constraints) hohe Langzeitstabilität	keine kontinuierlichen Messungen eingeschränkte Genauigkeit bei den zeitlichen Ableitungen
SLR	$x_p, y_p, dx_p/dt, dy_p/dt, LOD, dX/dt, dY/dt$	längste Beobachtungshistorie	eingeschränkte Genauigkeit eingeschränkte Parameterliste
LLR	Variation of Latitude (VoL), $dX, dY, UT0-UTC, dVoL/dt, dUT0-UTC/dt, dX/dt, dY/dt$	hohe Langzeitstabilität für Nutation	eingeschränkte Genauigkeit eingeschränkte Zahl von Beobachtungsstationen eingeschränkte Parameterliste
GPS	$x_p, y_p, dX_p/dt, dY_p/dt, LOD, dX/dt, dY/dt$	hohe Genauigkeit durch viele Beobachtungsstationen	eingeschränkte Parameterliste
DORIS	$x_p, y_p, dX_p/dt, dY_p/dt, LOD, dX/dt, dY/dt$	homogene Verteilung der Stationen	eingeschränkte Genauigkeit eingeschränkte Parameterliste

Forschungsziele

Systematiken in VLBI-Erdrotationsergebnissen sollen in Abhängigkeit der Netzwerkkonstellation untersucht werden mit dem Ziel, optimale Netzgeometrien und Analysestrategien zu identifizieren. Durch die konsistente Kombination der Verfahren VLBI und GNSS soll die Genauigkeit und Langzeitstabilität der Erdrotationsparameter sowie die Qualität zeitlich hochaufgelöster Erdrotationsparameter verbessert werden. Das Schätzen von zeitlich hochaufgelösten Polparametern mit GNSS-Beobachtungen führt zu einer Instabilität der Orientierung der GNSS Bahnen, da eine Verdrehung der Bahnen durch einen täglichen retrograden Term in der Polbewegung kompensiert werden kann. Anstelle der

Unterdrückung der Schätzung einer täglichen retrograden Bewegung des Pols (Thaller et al., 2008) kann eine Kombination mit VLBI-Beobachtungen die hochaufgelöste Polparameterschätzung stützen.

Mit GNSS bestimmte Polparameter zeigen anomale Perioden, welche nicht auf Gezeiten, sondern auf charakteristische Perioden der Satellitenbewegungen zurückgeführt werden können. Untersuchungen des Einflusses der verwendeten Bahnmodelle auf die Schätzung der Erdrotationsparameter sind erforderlich, um diese Zusammenhänge aufzudecken. Schließlich sollen hochaufgelöste Erdrotationszeitserien zur Validierung von Ozeangezeitenmodellen und zur Untersuchung der Librationsbewegung der Erde infolge der Dreiachsigkeit des Erdkörpers herangezogen werden.

Der Nutzen der Kombination von Messungen des Großringlasers mit VLBI-Beobachtungen wurde durch Mendes et al., 2009 nachgewiesen. Mit der seit dem Umbau wesentlich verbesserten Langzeitstabilität der Ringlaserdaten sollen die Untersuchungen fortgesetzt und die Kombination in die praktische Nutzung überführt werden. Ziel ist insbesondere sollen auch geeignete Kombinationsstrategien für eine echtzeitnahe Bestimmung von UT1-UTC unter Verwendung von GNSS- und Ringlaserdaten erarbeitet werden. Für eine konsistente Kombination der Verfahren sind Untersuchungen zur Konsistenz der geophysikalischen und technikspezifischen Modelle sowie zur optimalen Parametrisierung und zum optimalen Einsatz von Zusatzbedingungen erforderlich. Zudem ist für eine operationelle Anwendung die Entwicklung automatisierter Analysetools und Datenspeicherverfahren nötig.

Die Nutationsparameter, die zur Zeit mit den gängigen VLBI-Netzwerken bestimmt werden, bilden das IAU2000A-Nutationsmodell mit einer Genauigkeit von ca. 1 Millibogensekunde (mas) ab, sofern man die freie Nutation des Erdkerns (free core nutation) abspaltet. Der Nachteil der derzeitigen Messungen ist, dass keine kontinuierlichen Messungen durchgeführt werden, die eine tägliche Abtastung der Nutation ermöglichen. Ein denkbarer Ansatz zur Beseitigung dieser Schwäche wäre eine Kombination von täglichen GNSS-Messergebnissen und ungleichabständigen VLBI-Stützstellen. Aus GNSS-Messungen lassen sich zwar nur Nutationsraten ableiten, aber ihre Integration über nur wenige Tage mit Stützstellen am Anfang und am Ende des jeweiligen Zeitintervalls sollte stabil realisierbar sein. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die GNSS-Analysen auch die Schätzung von Nutationsraten vorsehen. Mit der gesamten Zeitreihe der dann mit täglicher Auflösung vorliegenden Nutationskorrekturen lässt sich zweifelsohne eine weitere Verbesserung des derzeitigen Nutationsmodells realisieren.

4.3 Meeresoberfläche

Stand der Forschung

Der Meeresspiegelanstieg ist sicherlich der prominenteste Indikator des Globalen Wandels. Ein Anstieg von derzeit ca. +3.3 mm/Jahr ist unbestritten (IPCC 2007), ebenso die Hauptursache, die globale Erwärmung der Erde, die zu einer Expansion vor allem der obersten Wasserschichten führt (Domingues et al., 2008). Weniger verlässlich sind die Beiträge durch das Abschmelzen kontinentaler Eismassen (Grönland, Antarktis, Gletscher), das Auftauen von Permafrostböden, den Austausch mit kontinentaler Wasserspeicherung, aber auch den Bau von Dämmen und Talsperrren. Mit Hilfe von GRACE und neuen in-situ Beobachtungen der ARGO floats kann der altimetrisch beobachtete Meeresspiegelanstieg aber immer schlüssiger in eine sterische- und eine Massenkomponente zerlegt werden (Leuliette & Miller 2009).

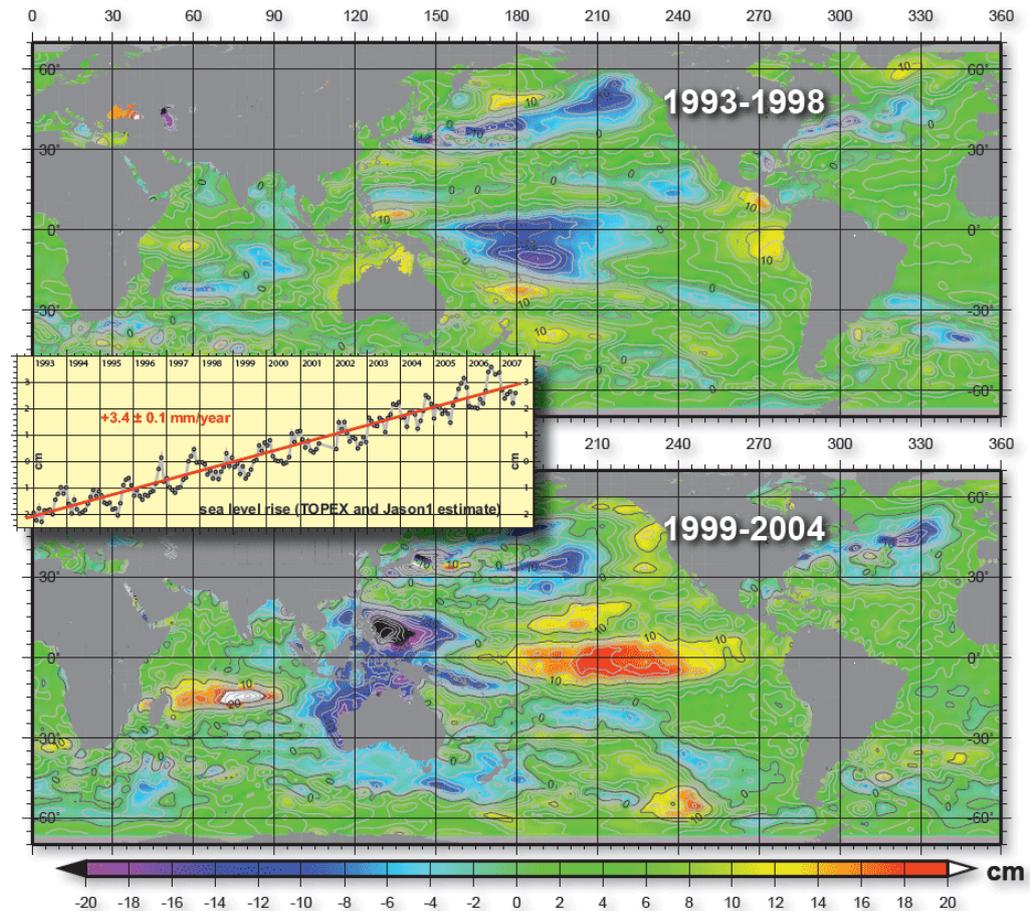


Abbildung 4.4: Die Zeitreihen von TOPEX und Jason-1 lassen auf einen globalen Meeresspiegelanstieg von $+3.4$ mm/Jahr schließen. Regional ergeben sich aber für die Perioden 1993–1998 und 1999–2004 wesentlich stärkere positive oder negative Änderungen bis zu ± 20 cm. Teilweise kompensieren sich die Änderungen der beiden 6-Jahresperioden. Über der Achse des Golfstroms ist der Meeresspiegel aber in beiden Perioden gesunken – ein Indiz für dessen Abschwächung.

Für die Prozesse des Systems Erde sind aber nicht nur die säkularen Veränderungen des Meeresspiegels von Bedeutung. Variationen des Meeresspiegels finden auf nahezu allen Raum- und Zeitskalen statt: saisonale Oszillationen auf Nord- und Südhalbkugel, episodische Ereignisse wie El Niño, halb- und ganztägige Gezeiten mit großräumigen Amplitudenmustern im offenen Ozean und einem Tidenanstieg von mehreren Metern an Küsten mit ausgedehnten Flachwassergebieten, oder kleinräumige, kurzzeitig Wirbel (Eddies), die sich vor allem in den starken westlichen Randströmungen ausbilden. Die Fähigkeit, die hydrodynamischen Vorgänge durch immer komplexere numerische Modellierung zu beschreiben, ist zwar enorm gestiegen, aber seit wenigen Jahrzehnten kann die Kinematik des Meeresspiegels auf nahezu allen Raum- und Zeitskalen durch eine präzise Vermessung mit Hilfe der Satellitenaltimetrie bestimmt werden.

Im Jahr 1992 begann mit Topex/Poseidon eine Beobachtungsperiode, die durch Jason-1 (2001) und Jason-2 (2008) fortgesetzt wurde und bis jetzt eine kontinuierliche Zeitreihe sehr präziser, fast globaler Meereshöhen mit einer 10-tägigen Wiederholrate liefert. Die Europäischen Missionen ERS-1, ERS-2, und ENVISAT ergänzten mit einem 35-Tage Wiederholzyklus, aber dichteren Bahnspuren diese Beobachtungen. Auch GFO und ICESat trugen zu weiteren Verdichtungen bei. Die Synergie all dieser Missionen (teilweise beobachteten bis zu 5 Altimeter gleichzeitig) war für die Satellitenaltimetrie eine der wissenschaftlichen Herausforde-

rungen der letzten Jahre (e.g. Pascual et al. 2007). Durch die erfolgreiche Kombination mehrerer Missionen wurde es möglich, sub-mesoskale Variationen, d.h. kleinräumige Wirbel (Eddies) von 50-200 km Ausdehnung und einer Lebensdauer von einigen Wochen, zu erkennen und zu verfolgen (Chelton et al. 2007). 90% der kinetischen Energie des Ozeans werden solchen Eddies zugesprochen. Weitere Steigerungen der räumlichen Auflösung und der Messgenauigkeit sind nur durch neue Technologien zu erreichen. Mit CryoSat-2 (Start: 04/2010) wird erstmals ein Altimetersystem eingesetzt, das neben dem klassischen, Impuls-begrenzten Radar einen „delay-doppler“ Betriebsmode (Raney 1998) und ein interferometrisches Altimetersystem mit einer 1m Basislinie aufweist (ESA 2007). Damit kann auch das Freibord des Meereises und topographisch raue Situation der kontinentalen Eisschilde vermessen werden. Seit vielen Jahren wird eine SWOT-Mission propagiert (Fu et al. 2009), die den Einsatz eines Synthetic Aperture Radar mit einer Basislinie von 10m vorsieht. Auch die GPS Reflektrometrie, bei der die L-Band Signale hochfliegender GPS-Satelliten vom Meeresspiegel reflektiert und von niedrig-fliegenden Satelliten empfangen werden, scheint Meereshöhen mit etwa 5 cm Genauigkeit bestimmen zu können (Helm et al. 2007).

Für die Geodäsie ist vor allem die Tatsache von Bedeutung, dass der Meeresspiegel in sehr guter Näherung im Gleichgewicht mit der Schwerkraft steht, d.h. der Meeresspiegel nahezu mit einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes (dem Geoid) zusammenfällt. Diese genäherte Koinzidenz wird genutzt um Schweredaten über der Meeresoberfläche abzuleiten (Sandwell and Smith 2009, Andersen and Knudsen 2009). Die marinen Schwereanomalien liegen mittlerweile auf einem 1'x1' Gitter vor und bilden eine entscheidende Grundlage für ultra-hochaufgelöste Schwerefeldmodelle wie das EGM2008 (Pavlis et al. 2008), das als Kugelfunktionsreihe bis Grad 2190 berechnet wurde.

Die Abweiche zwischen Geoid und Meeresoberfläche betragen nur $\pm 1-2$ m, werden durch hydrodynamische Prozesse verursacht und als Dynamische Ozeantopographie (DOT) bezeichnet. Mit der DOT sind im Prinzip auch die Oberflächenströmungen bekannt. Die DOT ist deshalb für Ozeanographie und Geodäsie gleichermaßen wichtig. Mit Hilfe von vertikalen Temperatur- und Salzgehaltprofilen können Oberflächenströmungen in die Tiefe fortgesetzt und der Transport von Masse und Energie bestimmt werden. Für die Geodäsie ist die Kenntnis der DOT ein Schlüssel für die Vereinheitlichung von Höhensystemen, die sich traditionell durch langjährige Mittelbildung von Küstenpegel-Registrierungen auf den mittleren Meeresspiegel, nicht auf das Geoid beziehen. Mehrere Abschätzungen der DOT durch numerische Modellierung liegen vor (Rio et al. 2009, Maximenko et al., 2009). Aber erst seit den entscheidenden Verbesserungen des Erdschwerefeldes durch CHAMP, GRACE und GOCE kann die absolute DOT auf geodätische Weise durch Subtraktion von Geoid und altimetrisch bestimmter Meeresoberfläche gewonnen werden. Die Kombination mit in-situ Messsystemen wie den ARGO floats, oder Oberflächenströmungen, die durch Küstenradar oder InSAR-Technologie gewonnen werden, wird die Bestimmung einer hoch aufgelösten, zeitlich variablen DOT ermöglichen und weiter verbessern.

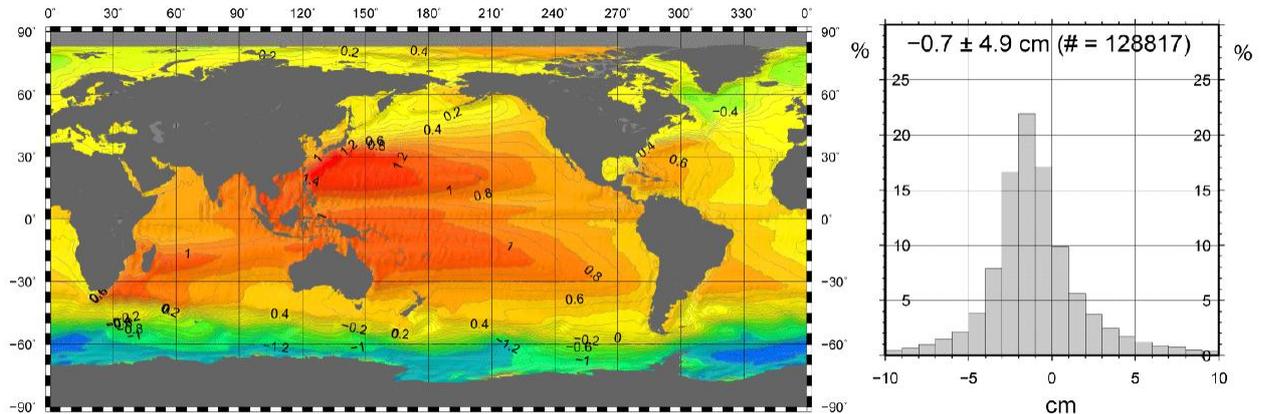


Abbildung 4.5: Mittlere Dynamische Ozean Topographie (DOT) für die Periode 1993 – 2008 (links), bestimmt durch einen geodätischen Ansatz, bei dem konsistent gefilterte Meereshöhen und Geoidhöhen voneinander abgezogen werden und (rechts) Histogramm der Differenzen gegenüber einer ozeanographischen Bestimmung von Maximenko et al. (2009) für dieselbe Periode.

Die Verbesserung und Anwendung der Satellitenaltimetrie im Küstenbereich hat sich in den letzten Jahren als weiterer Fokus entwickelt. Neben Fortschritten in der Modellierung von Flachwasserzeiten (Savcenko und Bosch, 2008; Ray 2008) wurden verbesserte Signalanalysen („re-tracking“) durchgeführt und Korrekturalgorithmen entwickelt für die in Küstennähe durch Radiometer gemessenen Laufzeitverzögerungen infolge des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre (Brown et al. 2007).

Eigene Vorarbeiten

Seit vielen Jahren arbeitet das DGFI an dem systematischen Aufbau und der Pflege eines umfassenden, homogenen Datenbestandes aller wichtigen Altimetermissionen (vergl. Tabelle 4.2). Der Zugriff auf die Daten der ESA Missionen (ERS, ENVISAT, CryoSAT-2, SARAL/Altika) ist dabei durch anerkannte Projekte gewährleistet; die Daten anderer Missionen stehen frei zur Verfügung. Die frühzeitige Planung und Umsetzung missionsunabhängiger Datenstrukturen mit einem generischen Format, das die schnelle Aktualisierung einzelner Parameter erlaubt, hat sich als entscheidender Vorteil erwiesen. Auf diese Weise können neu berechnete Satellitenbahnen, verbesserte Korrekturen für Gezeiten, die Reaktion des Ozeans auf Luftdruckänderungen und neue Kalibrationen für Radiometer übernommen werden ohne das der übrige Datenbestand gelesen und neu geschrieben werden muss. Mehrere Versionen eines Parameters können parallel verwaltet werden, die Datenstruktur wird deshalb als „Multi-Version Altimetry“ (MVA) bezeichnet. Durch zahlreiche internationale Kontakte und die Mitgliedschaft in dem wissenschaftlich führenden „Ocean Surface Topography Science Team“ für Jason ist ein Zugriff auf neueste Ergebnisse gewährleistet, so dass die Daten bezüglich Umfang, Aktualität und Qualität mit denen anderer Institute und Organisationen (PO.DAAC, AVISO, DEOS, CTOH) vergleichbar sind und diese z.T. übertreffen.

Für Missionen mit einem sich wiederholenden Bahnmuster wurde darüber hinaus eine parallele Datenstruktur entwickelt, die durch Umorganisation der sequentiell vorliegenden Daten direkte Zeitreihenanalysen auf kleinen, eng begrenzten Zellen der Bahnspur (BIN) ermöglicht. Dies ist in zahlreichen regionalen und globalen Analysen für nahezu alle Raum- und Zeitskalen genutzt worden (Kuhn et al. 2005, Marcos et al. 2007, Bosch 2008). Höhepunkt dieser Analysen ist die empirische Ableitung eines globalen Gezeitenmodells (EOT08a) auf einem $7.5' \times 7.5'$ Gitter für die Partialtiden M2, S2, N2, K2, O1, K1, P1, Q1, und die Flachwasser-tide M4 (Savcenko & Bosch, 2008). Verbesserungen wurden vor allem im Flachwassergebiet erreicht (vgl. Abbildung 4.6).

Tabelle 4.2: Satellitenaltimetrie – Missionsübersicht und Datenbestand am DGFI

Mission	Daten-Zugang (verfügbar)	Betrieb Von - bis	Breiten-Abdeckung	Wiederholzyklus [Tage]	Spurabstand [km]	Sensortechnologie
GeoSat	Öffentlich	03.1985 – 10.1986	$\pm 72.0^\circ$	-/17	3/165	Radar
ERS-1	Durch AO	04.1992 – 04.1996	$\pm 81.5^\circ$	3/35/169	932/80/17	Radar
TOPEX	Öffentlich	09.1992 – 10.2005	$\pm 66.1^\circ$	9.9156	315	Zweifrequenz-Radar
ERS-2	Durch AO	04.1995 – 04.2003	$\pm 81.5^\circ$	35	80	Radar
GFO	Öffentlich	01.2000 – 09.2008	$\pm 72.0^\circ$	17	165	Radar
Jason-1	Öffentlich	01.2002 – ...	$\pm 66.1^\circ$	9.9156	315	Zweifrequenz-Radar
ENVISAT	Durch AO	09.2002 – ...	$\pm 81.5^\circ$	35	80	Zweifrequenz-Radar
ICESat	Öffentlich	10.2003 – ...	$\pm 86.0^\circ$	91	30	Laser
Jason-2	Öffentlich	07.2008 – ...	$\pm 72.0^\circ$	9.9156	315	Zweifrequenz-Radar
CryoSat-2	Durch AO	04.2010 – ...	$\pm 88.0^\circ$	369 (~30)	7	Radar + Delay-Doppler + Interferometrisches SAR
SARAL/Altika	Durch AO	??2010	$\pm 81.5^\circ$	35	80	Radar, Ka-Band
HY-2A	-	??2010	$\pm 99.3^\circ$	14/168	190/17	Zweifrequenz-Radar
Jason-3	-	~ 2013	$\pm 66.1^\circ$	9.92 (?)		Wide Swath
Sentinel-3	-	~2015	$\pm 81.5^\circ$	20		Zweifrequenzradar

Das Modell ist international anerkannt, wird für die Berechnung von loading-Effekten benutzt und steht in Konkurrenz zu GOT4.7 (Ray 2008), TPX07.1 und anderen Modellen. Verbesserungen globaler Gezeitenmodelle sind auch für das „de-aliasing“ der Beobachtungen von GRACE und GOCE wichtig (Bosch et al., 2009).

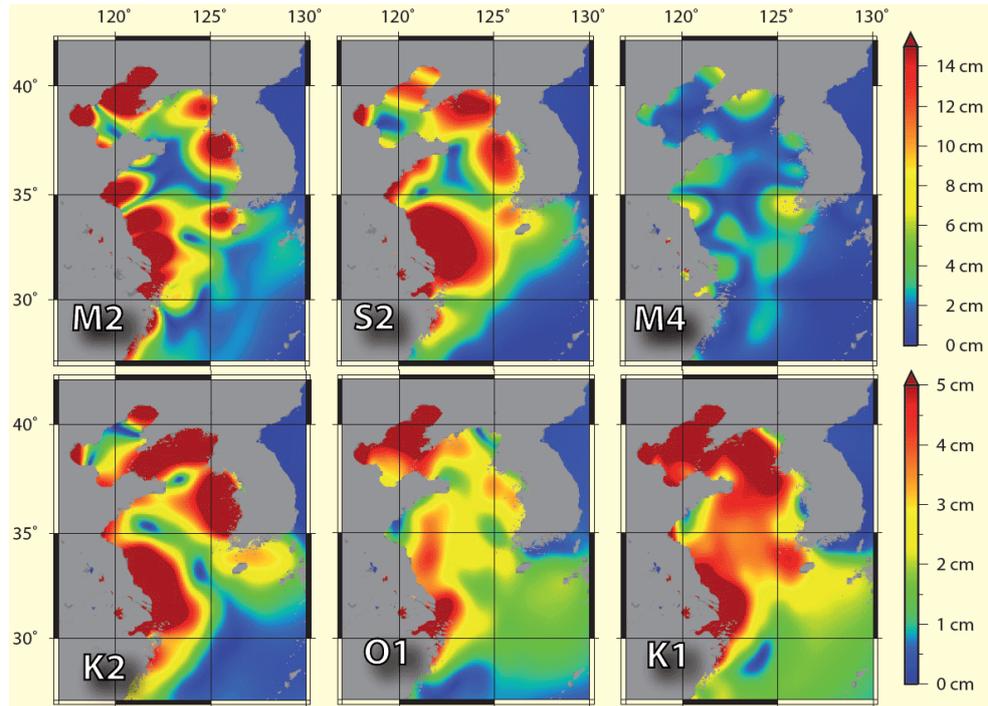


Abbildung 4.6: Amplitudenkorrekturen (gegenüber dem Referenzmodell FES2004) einiger Partialtiden die für den Bereich der „Yellow Sea“ durch empirische Gezeitenanalyse für das Gezeitenmodell EOT08a (Savcenk & Bosch, 2008) identifiziert wurden.

Das Interesse an den MVA und BIN Datenbeständen des DGFI ist ständig gewachsen. Deshalb wurde mit der Entwicklung eines Web Portals¹ begonnen, das Aufträge für räumlich und zeitlich definierte Datenauszüge entgegen nimmt und im Batch-Betrieb bearbeitet. Für die wichtigsten Anwendungen (Meereshöhen, Meereshöhenanomalien, Meerestopographie) werden Standardformate angeboten. In einem Experten-Modus können aber auch eigene Datenformate definiert und Berechnungen mit den vorhandenen Parametern durchgeführt werden.

Eine Analyse mit Alleinstellungsmerkmal des DGFI besteht in der relative Kalibrierung aller simultan messenden Altimetersysteme (Bosch und Savcenko 2005), die sonst nur für die kurzen Tandem-Phasen zweier aufeinanderfolgenden Satelliten mit identischer Bahnspur durchgeführt wird. Durch die gemeinsame Ausgleichung aller Kreuzungspunkt-Differenzen in allen Kombinationen entsteht ein stark redundantes Netzwerk, durch dessen Ausgleichung die radialen Bahnfehler aller beteiligten Missionen geschätzt werden. Diese Bahnfehler enthalten nicht nur relative „range biases“, sondern decken auch unterschiedliche Geozentrums-Bezüge der berechneten Satellitenbahnen und sogenannte geographisch korrelierte Fehler der einzelnen Missionen auf. Diese Fehler besitzen großräumige Muster und bilden sich direkt in die Meeresoberfläche ab, sind aber durch Analyse einzelner Altimetersysteme nicht erkennbar. Da mit der relativen Kalibrierung die radialen Bahnfehler für die gesamte Missionszeit geschätzt werden können, ist auch eine robuste statistische Charakterisierung der Altimeterdaten jeder Mission durch empirische Autokovarianzfunktionen möglich. Das Verfahren ist zuletzt auf die relative Kalibration von Jason-2 angewendet worden (Dettmering und Bosch, 2010).

TUM und DGFI arbeiten seit einigen Jahren an einer verlässlichen Abschätzung der absoluten DOT, die in ein numerisches Ozeanmodell assimiliert werden soll, um Massentransporte im Atlantischen Sektor des

¹ <http://openadb.dgfi.badw.de/>

Antarktischen Zirkumpolarstroms abzuschätzen. In diesem Gebiet finden der Massenaustausch zwischen Pazifik, Atlantik und Indischem Ozean statt. Die geodätische Vorgehensweise, d.h. Geoid und Meeresoberfläche zu subtrahieren, wird mit dem Ziel durchgeführt, beide Flächen mit konsistenten spektralen Eigenschaften und realistischer Fehlerabschätzung zu behandeln (Albertella & Rummel, 2009, Bosch & Savcenko, 2009).

Forschungsziele

Die Satellitenaltimetrie hat sich als Raumverfahren mit einem sehr breitem Anwendungsspektrum in der geodätischen Erdsystemforschung erwiesen: hochaufgelöstes marines Schwerfeld; Figur der Erde; Meeresspiegelanstieg, dynamische Ozeantopographie; großräumige Zirkulationen, Gezeiten und die damit verbundenen Auflasteffekte, Eddies, Massen und Energietransporte, globaler Wasserzyklus, Eismassenbilanzierung, Vereinheitlichung von Höhensystemen. Die Satellitenaltimetrie ist ein Kernelement eines „Global Geodetic Observing System“ (GGOS). Als übergeordnete Zielsetzung muss deshalb eine möglichst lange Zeitreihe präziser Altimetermessungen bewahrt werden und durch konsistente Kalibrierung und Kombination ein einheitlicher, gesicherter Bezug dieser Zeitreihen zum Geozentrum erarbeitet werden. Mit dieser Kernkompetenz können die vielfältigen Beiträge zur Erdsystemforschung geleistet werden.

- Datenbestände sollen weiter ausgebaut und gepflegt werden. Dies beinhaltet die Implementation von Schnittstellen für neue Missionen, die Harmonisierung der Daten, missionspezifische Upgrades, absolute und relative Kalibrationen sowie das Bereitstellen von Web-Interfaces für interne und externe Nutzer, für Experten und interessierte Laien. Wegen der riesigen Datenmengen (TerraByte) sind die Informationstechnischen Anforderungen für sich herausfordernd (s. Abschnitt 3.2.5).
- Die Analyse und Beschreibung der Kinematik des Meeresspiegels im regionalen und globalen Maßstab erfordert Zeitreihenanalysen (Frequenz- und EOF-Analysen), Vergleiche mit langjährigen Pegelmessungen und die historische Rekonstruktion der Meeresspiegelentwicklung. Es sollen konsolidierte Produkte zum „sea level rise“, zu regionalen Meeresspiegeländerungen und mittelskaligen Vorgängen wie der Identifizierung und Verfolgung von Eddies bereitgestellt werden.
- Eine bessere Trennung von Partialtiden und damit eine Verbesserung der empirischen Gezeitenanalyse soll durch längere Zeitreihen und/oder neuen Missionen mit ergänzenden Abtasteigenschaften erreicht werden. Dies beinhaltet die Analyse kleinerer Partialtiden mittels Responsemethode, Kombination mit numerischer Modellierung, Berücksichtigung korrelierter Beobachtungen, Varianzkomponentenschätzung und die Kombination mit GRACE Gezeitenanalysen. Ziel ist die Ableitung neuer globaler Gezeitenmodelle mit Fehlerabschätzung (EOT09).
- Schwerfelddaten von GRACE und GOCE sollen mit den Daten der Satellitenaltimetrie kombiniert werden. Es sollen auch geodätische Missionsphasen (Geosat, ERS-1) oder driftende Bahnkonfigurationen (ICESat, CryoSAT) genutzt werden, um hochauflösende Schwerfeldstrukturen zu bestimmen. Geoid und Dynamische Ozean Topographie sollen in einer gemeinsamen Ausgleichung konsistent geschätzt werden; Schweregradienten von GOCE und aus der Altimetrie sollen verglichen werden.
- Untersuchungen zur Abschätzung des sterischen Effekts sind erforderlich, um Massen und Volumeneffekte von Meeresspiegelvariationen zu separieren. Genutzt werden sollen Klimatologien (Levitus, Is-

hii, ...), Ocean Bottom Pressure Variationen aus numerischen Modellen, GRACE Daten; ARGO-floats

- Expertise für neue Sensor-Technologien (CryoSat: delay Doppler und interferometrisch SAR; Jason-3: Wide swath altimetry; LEOs: GPS reflection) soll aufgebaut werden. Neue Technologien zur Vermessung und Überwachung von kontinentalen Eisflächen und Meereis sollen genutzt werden, um Beiträge zur Abschätzung der aktuellen Eismassenverluste von Antarktis, Grönland und Gletscherregionen zu leisten.
- Schließlich beteiligt sich die FGS weiter maßgeblich am Aufbau des International Altimeter Services.

4.4 Schwerefeld

4.4.1 Satellitengravimetrie

Stand der Forschung

Die Forschungsarbeiten im Bereich Schwerefeld werden untergliedert in

- Konsistenz zwischen Schwere, Erdrotation und geometrischer Erdfigur,
- Modellierung des stationären Anteils des Schwerefelds aus Satellitengravimetrie,
- hoch auflösende Modellierung des stationären Schwerefelds aus der Kombination von terrestrischen, altimetrischen und Satellitendaten,
- Bestimmung des zeitvariablen Anteils des Schwerefelds aus Satellitengravimetrie (und terrestrischer Gravimetrie),
- zukünftige Satellitenmissionen und Missionskonzepte,
- sehr genaue Bahnbestimmung mit GPS und
- geodätische bzw. geowissenschaftliche Nutzung der neuen Modellgeneration (stationäres und zeitvariables Schwerefeld).

Durch die neuen Möglichkeiten der Satellitengravimetrie und insbesondere durch den Erfolg der Satellitenmissionen CHAMP und GRACE erhielt das gesamte Forschungsfeld in der nun ablaufenden Berichtsperiode einen erheblichen Auftrieb. Erstmals lassen sich auch zeitliche Veränderungen in Erdschwerefeld erfassen. Man könnte sagen, es lässt sich das Gewicht der Massenänderungen im Erdsystem bestimmen. In Kombination mit den geometrischen Verfahren (GNSS, Altimetrie, InSAR) ergeben sich wichtige Möglichkeiten zur Erforschung der Dynamik der Ozeane, Eisschilde, des Wasserkreislaufs und der festen Erde. Aus dieser Entwicklung erwachsen gleichzeitig steigende Anforderungen an die Messwertverarbeitung, Modellbildung und Interpretation. Parallel ergeben sich auch aus GGOS höhere Anforderungen an die Schwerefeldmodellierung.

Das Konsistenzproblem steht dabei am Anfang. Es ist von grundlegender Bedeutung für die Verknüpfung der Schwerefeldzeitreihen mit den Variationen der Erdfigur und der Erdrotationszeitreihen. Ziel ist bei letzteren insbesondere die Trennung von Bewegungs- von Masseanteilen. Eine konsistente Verknüpfung von Figur, Erdrotation und Schwere ist außerdem Grundvoraussetzung für die Schaffung eines globalen erdfesten Referenzsystems mit einer relativen Genauigkeit von 1 ppm.

Das stationäre langwellige Schwerefeld konnte mit den Messungen von CHAMP und GRACE signifikant verbessert werden. GRACE erlaubt grundsätzlich eine räumliche Auflösung von Grad und Ordnung 150. Dabei werden aber Streifenmuster erkennbar, deren Ursache bis dato noch nicht umfassend geklärt ist. Gefilterte Modelle aus GRACE erreichen eine räumliche Auflösung von ungefähr Grad und Ordnung 80 mit einer kumulativen Geoidunsicherheit von unter einem Zentimeter. Dennoch bleibt

noch Forschungsbedarf u.a. im Bereich der niedrigen zonalen Kugelfunktionsterme, deren Schätzung Schwächen zeigt. Eine wesentliche Verbesserung der räumlichen Auflösung wird von GOCE erwartet, der ersten Satellitenmission mit einem Gravitationsgradiometer. Man ist jedoch, wie auch 2002 im Fall von GRACE, mit einem völlig neuartigen Messkonzept konfrontiert, das in seinem Verhalten noch erforscht werden muss.

Bei der Kombination von Satellitengravimetrie, Satellitenaltimetrie und terrestrischen Daten wurde durch das Modell EGM2008 auf amerikanischer Seite ein Quantensprung vollzogen. Nach einer sehr aufwändigen Analyse und Reanalyse aller benutzten Datensätze und der Einbeziehung des GRACE-Schwerefeldmodells der Universität Bonn entstand ein Modell bis Grad und Ordnung 2160. Dies entspricht räumlichen Skalen von ca. 10 km. Nur die Einbeziehung von GOCE und einiger zusätzlicher regionaler Datensätze lässt eine weitere Verbesserung erwarten.

Zeitvariationen des Erdschwerefelds – verursacht durch Massenverlagerungen in Atmosphäre, Ozeanen, Eisschilden, kontinentalem Wasserkreislauf und in der festen Erde – waren vor den Missionen CHAMP und GRACE nur ansatzweise in einigen niedrigen zonalen Koeffizienten messbar; durch Analyse von Lasermessungen zu den geodätischen Satelliten LAGEOS-1 und 2. Die GRACE-Mission liefert erstmals komplette Monatsmodelle bis Grad und Ordnung 120, wobei aufgrund der oben erwähnten Streifenmuster die Schwerefeldsignale nur bis zu ca. Grad und Ordnung 30 zur geophysikalischen Interpretation herangezogen werden können. Schrittweise konnte über die Technik des De-Aliasing mit erdwissenschaftlichen Hintergrundmodellen eine Detailanalyse des gesamten Sensorsystems und die Verbesserung der eigentlichen Prozessierung ein hoher Genauigkeitsstand erreicht werden.

Über die GRACE-Mission wurde also das Wägen von Massenverlagerungen im Erdsystem erstmals möglich. Es entstand ein neues Element der Erdsystemforschung. Es zeichnet sich ab, dass GRACE Zeitreihen von sehr großem Wert für die Klimaforschung sind. Man denke an die Eismassenbilanzierung in Grönland und in der Antarktis, an die Erfassung des Wasserkreislaufs der großen Flusseinzugsgebiete und die Separation des thermohalinen Anteils vom Beitrag durch Eisabschmelzung bei der Erforschung des Meeresspiegelanstiegs.

Voraussetzung für den Erfolg der Missionen CHAMP, GRACE und GOCE ist die extrem genaue Bahnberechnung dieser Satelliten mit Hilfe von GPS. Erstmals konnten die Bahnen von Satelliten im erdnahen Orbit mit Hilfe von GPS unterbrechungsfrei und dreidimensional erfasst werden. Bahngenauigkeiten erreichen das Zentimeterniveau. Sind diese Satelliten zusätzlich mit genauen Beschleunigungsmesssystemen ausgestattet – sie erfassen die nicht-gravitativen Störeinflüsse auf den Satelliten – so lässt sich die rein gravitative Bahnbewegung rekonstruieren oder mit Kompensationsdüsen direkt realisieren. Damit gewinnen Satellitenbahnen sowohl für die Schwerefeldbestimmung als auch für rein geometrische Anwendungen eine große Bedeutung.

Im Vergleich zu den intensiven Aktivitäten der FGS auf jedem der obigen Felder, waren die Arbeiten auf dem Gebiet der wissenschaftlichen Nutzung der Satellitengravimetrie in Geodäsie und Erdwissenschaften weniger umfassend. Für die nun folgende Berichtsperiode sollen die Arbeiten zur wissenschaftlichen Nutzung verstärkt werden. Darüber hinaus beteiligt sich die FGS mit Überlegungen, Analysen und Vorschlägen an Initiativen, eine Folgemission im Bereich der Satellitengravimetrie in die Wege zu leiten. Denn die mit GRACE begonnene Erfassung und Quantifizierung von Massenverlagerung im Erdsystem erfordert die durchlaufende Bestimmung von Zeitreihen.

Eigene Vorarbeiten

Neben den noch stets erfolgreich laufenden Missionen CHAMP (Start im Jahr 2000) und GRACE (Start im Jahr 2002) befindet sich seit dem 17. März 2009 auch GOCE in einer Umlaufbahn um die Erde. Mit diesen drei Missionen konnte die Satellitengravimetrie, d.h. die Schwerefeldbestimmung mit auf die Gravimetrie ausgelegten Sensorsystemen als neue Methode etabliert werden.

Basierend auf der Berner GPS-Auswertesoftware entwickelten Rothacher und Svehla (2002) Methoden der kinematischen und der reduziert-dynamischen Bahnbestimmung von niedrigfliegenden Satelliten (Low Earth Orbiters = LEOs). Bei der kinematischen Methode wird die geometrische Position des Satelliten direkt aus der Kombination von GPS-Code- und Phasenmessungen gewonnen. Die reduziert-dynamische Bahnbestimmung erweitert einen rein dynamischen Ansatz um stochastische Anteile, um eine bessere Bahnabstimmung zu erzielen. Voraussetzung ist immer eine sehr enge Bahnabstimmung mit Hilfe eines GPS-Empfängers an Bord des LEO. Beide Ansätze wurden von mehreren Forschergruppen aufgegriffen und weiterentwickelt. Besonders erwähnenswert ist dabei der Ansatz am Astronomischen Institut der Universität Bern (Jäggi, 2007). Am IAPG wurden diese Verfahren auf die Konstellation der COSMIC-Satelliten und auf CHAMP und GRACE angewandt, hier als Grundlage für eine Bestimmung des Schwerefelds. Kinematische und reduziert-dynamische Bahnbestimmung sind inzwischen Standardverfahren in der Satellitengeodäsie.

Die weitgehend unterbrechungsfreie und zentimetergenaue Bahnbestimmung der mit GPS ausgestatteten LEOs eröffnet neue Möglichkeiten der Gravitationsfeldbestimmung. Neben den klassischen Ansätzen des CSR, JPL, CNES/GRGS und GFZ traten erfolgreiche Alternativansätze mehrerer universitärer Gruppen. In der FGS wurden verschiedene Varianten der Nutzung des Energieintegrals entwickelt. Der Grundgedanke entstammt der Dissertation von Herrn Reigber. Dabei werden Bahngeschwindigkeiten über den Energieerhaltungssatz in Gravitationspotentialwerte übersetzt. Dieser methodisch grundsätzlich sehr einfache Ansatz fand Eingang in die sogenannte Quick-Look-Prozessierung von GOCE. Er enthält jedoch einige vereinfachende Annahmen und ist nicht unmittelbar auf die Analyse der Intersatellitenmessungen von GRACE übertragbar.

Die Brücke von hochgenauer Bahnbestimmung mit Methoden der Himmelsmechanik zur Gravitationsfeldanalyse wird im Rahmen des Projekts „Satellitengeodäsie“ durch das Institute of Advanced Study (IAS) der TU München gefördert. Hieraus erwuchs eine enge Zusammenarbeit zu G. Beutler und A. Jäggi vom Astronomischen Institut der Universität Bern.

GOCE wurde am 17. März 2009 von Plesetsk, Russland aus in seine Umlaufbahn gebracht. Alle Instrumente arbeiten einwandfrei. Kerninstrumente für die Gravitationsfeldbestimmung sind ein dreiachsiges Gravitationsgradiometer und ein GPS-Empfänger europäischer Bauart. Das gesamte Sensorsystem gewährleistet die für die Gravitationsgradiometrie optimale und perfekt kontrollierte Laborumgebung (Sternsensoren, Dragkompensationssystem, magnetische Drehmomentgeber, Kaltgasdüsen). Wissenschaftler der FGS sind in mehrfacher Weise an der wissenschaftlichen Datenauswertung und dem Monitoring dieser Mission beteiligt. Sie entwarfen in der Vorbereitungsphase Teile des „end-to-end“-Simulators des Hauptauftragnehmers ALENIA. Im Auftrag der ESA wurden Beiträge zur GPS- und Gradiometerauswertung des Payload Data System (PDS) geliefert. Die Arbeiten des High-Level Processing (HPF) werden in München koordiniert, mit zusätzlichen Beiträgen zur Vorverarbeitung der Gradiometermessungen, Bahnbestimmung aus GPS, Quick-Look-

Analyse und Validierung der Schwerefeldmodelle. Schließlich entstanden hier Elemente der Calibration and Monitoring Facility (CMF).

GRACE erfasst die zeitlichen Variationen des Erdschwerefelds. Die mathematische Darstellung erfolgt bei den meisten Analysezentren in Form von zeitvariablen Koeffizienten einer sphärisch-harmonischen Reihe. Die Ursache der temporalen Veränderungen sind Massenverlagerungen in Atmosphäre, Ozeanen, Eisschilden, im kontinentalen Wasserkreislauf und in der festen Erde.

Trotz hervorragender Resultate erreicht GRACE bis heute nicht ganz das geplante Genauigkeitsniveau. Die Ursachen könnten entweder kleine Imperfektionen im Sensorsystem oder im Auswertesystem sein. Es wurden daher Untersuchungen zur Level-1-Prozessierung und zum Verhalten der Beschleunigungsmesssysteme und Sternsensoren unternommen. Insbesondere wurde die Prozessierungskette nachvollzogen, um die Auswertung von Störereignissen in den Beschleunigungsmessungen zu untersuchen. Parallel laufen Analysen zum De-Aliasing, d.h. zur bestmöglichen a priori Modellierung von kurzperiodischen Zeitvariationen im Schwerefeld, mit Hilfe von Zeitreihen der Ozeangezeiten, Atmosphäre und Ozeane. Ein Ansatz, die Unsicherheiten dieser Modelle streng zu berücksichtigen, brachte bisher nur geringe Verbesserungen.

Seit 2002 ermöglicht die Satellitenschwerefeldmission GRACE die direkte Beobachtung von großskaligen Massenverlagerungen im Erdsystem mit einer zeitlichen Auflösung von einem Monat und mit einer räumlichen Auflösung von wenigen 100 km. Da atmosphärische und ozeanische Effekte bereits während der Prozessierung der GRACE-Daten aus den Beobachtungen reduziert werden, spiegeln die verbleibenden Schwerefeldänderungen vor allem Variation der kontinentalen Wasserspeicherung wider. Im jüngsten Bericht des Internationalen Weltklimarates (IPCC) aus dem Jahre 2007 wird die kontinentale Hydrologie als die am wenigsten genau bekannte Komponente des globalen Wasserkreislaufs identifiziert.

In mehreren Studien wurden globale und regionale GRACE-Schwerefeldlösungen mit unabhängigen hydrologischen Modellsimulationen verglichen und über die atmosphärisch-terrestrische Wasserbilanz aus Niederschlag, Verdunstung, Oberflächenabfluss und GRACE-Speicheränderung bilanziert (Seitz et al., 2008; Schmidt et al., 2008; Schmidt und Seitz, 2008; Seitz und Schmidt, 2007). Es konnte gezeigt werden, wie sich extreme Wetterereignisse wie Überschwemmungen oder Dürren auf die Variation des Schwerefeldes auswirken. Daneben erlaubten die Analysen der GRACE-Daten die Identifikation von Fehlern in den hydrologischen Modellen.

Die Zeitreihen der Schwerevariationen von GRACE stellen eine völlig neuartige Messgröße bei der Erforschung des Erdsystems und des Klimawandels dar. Es ist daher sehr wichtig, dass diese Messreihen auch nach Missionsende – möglichst ohne Unterbrechung – fortgesetzt werden. Dies war auch das einstimmige Ergebnis eines Workshops von Wissenschaftlern aus den Bereichen Satellitengravimetrie, aus erdwissenschaftlichen Anwendungsfeldern von GRACE und der Gravitationsphysik im April 2007 in Noordwijk (Koop und Rummel, 2008). Auf diesem Workshop wurden die Prioritäten der kommenden Jahre diskutiert und in mehreren Resolutionen festgeschrieben. An der Ausarbeitung dieser Vorschläge und insbesondere an der Entwicklung eines Missionskonzepts wird seither in ESA-Studien, im Rahmen von GGOS und im Rahmen des Geotechnologienprogramms geforscht. Im Rahmen des zweiten Workshops des GGOS/IGCP (International Geoscience Programme) 565 Projekts ("Developing the Global Geodetic Observing System into a Monitoring System for the Global Water Cycle") mit dem Titel "Towards a roadmap for future satellite gravity missions", der im Oktober 2009 in

Graz, Österreich, stattfand, wurden die Resolutionen des Noordwijk-Workshops verfeinert und weiterentwickelt.

Die Arbeiten zum Thema Schwere wurden im Berichtszeitraum aus Mitteln der ESA, des Geotechnologienprogramms des BMBF und des DFG-Schwerpunktprogramms „Massentransporte“ gefördert.

Forschungsziele

Wesentliche Veränderungen der Randbedingungen im Bereich Schwerefeldforschung sind die Berufung von R. Pail auf den Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München als Nachfolger von R. Rummel und die Formung des „Centrum für geodätische Erdsystemforschung“ in München. In diesem Konsortium werden Forschungsarbeiten der Erdmessungskommission der BAdW, des DGFI, des IAPG und der FESG aufeinander abgestimmt und neu formuliert.

Zentrales Thema bleibt die wissenschaftliche Verarbeitung der Daten von GOCE und, zukünftig verstärkt, die wissenschaftliche Nutzung dieser Daten. Ein zweiter Schwerpunkt werden die Arbeiten für und an einer GRACE-Folgemission sein. Diese Aktivität geschieht in enger Zusammenarbeit mit europäischen und deutschen Partnern. Übergreifendes zentrales Anliegen ist die Verknüpfung von Schwere mit den Bereichen Geometrie und Erdrotation mit dem Ziel einen fundierten Beitrag zu GGOS und damit zur Erforschung des Erdsystems zu liefern.

Entscheidend bei Bestimmung des Erdschwerefeldes ist Verständnis in Theorie und Anwendung der verschiedenartigen Sensoren zur Beobachtung des Schwerefeldes. Dies schließt Beobachtungssysteme im Welt- raum, auf Flugzeugen sowie auf der Erdoberfläche ein. Neben Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung bekannter Beobachtungstechniken und der detaillierten Sensoranalyse sollen auch neuartige Beobachtungskonzepte entwickelt werden. Hierzu sind entsprechende Simulationsprozesse weiterzuentwickeln, die es erlauben, Aussagen über zukünftige Beobachtungs- und Missionsszenarien zu tätigen. Das theoretische Fundament für die Nutzung der Beobachtungen soll so weiterentwickelt werden, dass die nun verfügbaren höchstpräzisen Messungen in einem gemeinsamen Ansatz zur Schwerefeldbestimmung verwendet werden können. Hierzu sind regionale und globale Auswertemodelle weiterzuentwickeln, die es erlauben, aus den aufbereiteten Beobachtungen entsprechende Modelle des Erdschwerefeldes mit Genauigkeiten und Auflösungen zu berechnen, die im wesentlichen nur von den verfügbaren Beobachtungsgrößen abhängen. Zusammen mit potentiellen Nutzern sind Anwendungsstrategien für die globalen und regionalen Modelle zu entwickeln, um das Potential der Schwerefeldmodellierung innerhalb der Erdsystemforschung auszuloten.

Simulationsprozesse

Räumliche und zeitliche Auflösung sowie erzielbare Genauigkeit des berechneten Erdschwerefeldmodells hängen im wesentlichen von den Fehlercharakteristiken der Sensoren und der räumlich/zeitlichen Abtastung des Sensorträgers ab. Sensorcharakteristiken und Abtastung spielen auch eine entscheidende Rolle für die Wahl des Auswertekonzeptes (siehe auch Modellierung). Für die Planung von Satellitenmissionen zur Schwerefeldbestimmung sind daher möglichst realitätsnahe Simulatoren unerlässlich.

Die vorhandenen Techniken zur Analyse und Budgetierung von Sensor- und Fehlerverhalten sollen weiterentwickelt werden, so dass diese auch für mögliche zukünftige Schwerefeldsensoren angewendet werden können. Existierende und neuartige Simulatorkonzepte, unter Einbeziehung aller zeitlicher Schwerefeldvariationen, beliebiger Sensorcharakteristiken

und Missionsszenarien (Mehrsatellitenkonzepte), sollen fortgeführt bzw. entwickelt werden.

Theorie und Aufbereitung der Beobachtungen

Um die Schwerefeldbeobachtungen in einem Auswertemodell nutzen zu können, müssen diese in vielen Fällen zunächst konsistent aufbereitet und zum Teil reduziert werden. Um die heute erzielbaren Messgenauigkeiten auch in der Modellierung adäquat nutzen zu können, ist es notwendig, entsprechende Genauigkeiten auch in der Aufbereitung der Beobachtung zu gewährleisten. Hierzu sind in einigen Fällen auch Verbesserungen im theoretischen Fundament notwendig.

Um die GOCE Gradiometerdaten optimal nutzen zu können, muss die Aufbereitung von den Rohmessungen zu den Schwerefeldgradienten vollständig verstanden sein. Hierzu sollen die einzelnen Prozessierungsschritte detailliert analysiert werden. Weiterhin wird die Sensitivität einzelner Elemente des Gradiententensors auf das Erdschwerefeld untersucht. Es soll ein Konzept zur Kombination von GOCE Gradienten mit anderweitig bestimmten Schweregradienten (globale Modelle, Altimetrie) auf Beobachtungsebene entwickelt werden.

Regionale und globale Modellbildung

Zur Modellierung des regionalen, globalen und zeitlich variablen Erdschwerefeldes steht eine Vielzahl von Modellierungsmethoden zur Verfügung. Hauptunterschied zwischen den Ansätzen sind die im mathematischen Modell verwendeten Basisfunktionen. Hier muss zwischen den regionalen und globalen Ansätzen unterschieden werden, wo bestimmte Funktionen auf Grund ihrer Eigenschaften jeweils vorteilhaft eingesetzt werden können. Ein wichtiger Aspekt in der Modellierung des zeitvariablen Anteiles liegt in der Strategie, welche Signale in der Modellierung bereits abgetrennt werden, welche im Signal erhalten bleiben und wie zeitvariable Anteile im Auswertemodell parametrisiert werden. Da sich Datenüberdeckung und Genauigkeit wesentlich gesteigert haben, sind heute auch entsprechend große Modellauflösungen erreichbar, was die Verarbeitung und Lösung sehr großer Gleichungssysteme impliziert. Schließlich müssen die Genauigkeiten der globalen und regionalen Modelle durch Vergleich mit unabhängigen Messungen überprüft werden. Hier spielt das grundsätzliche Problem der Vergleichbarkeit von bandlimitierten Signalen (aus den Modellen) mit punktuellen Beobachtungen eine Rolle.

Die entwickelten Methoden und Modelle sollen schließlich zur Berechnung international konkurrenzfähiger globaler und regionaler Erdschwerefeldmodelle aus terrestrischen und Satellitendaten, Satellitenaltimetrie und SLR eingesetzt werden. Es soll insbesondere auf die konsistente Verarbeitung der verschiedenartigen Informationsquellen geachtet werden. Hier ist speziell auch eine enge Verknüpfung zum Forschungsbereich Geometrie notwendig, in dem die grundlegenden Referenzsysteme bereitgestellt werden.

Anwendungsstrategien

Für ausgewählte Anwendungsgebiete im statischen Bereich sollen entsprechende Strategien zur Nutzung der Schwerefeldmodelle entwickelt werden. Es ist zu beachten, dass die berechneten globalen und regionalen Schwerefelder (speziell die zeitvariablen Anteile) auch eine der wesentlichen Eingangsgrößen für die Erdsystemforschung sind. Hier werden weitere Anwendungsfelder erschlossen.

- **Ozeanströmungssysteme.** Zusammen mit der Ozeanographie soll untersucht werden, welchen Einfluss die verbesserten Schwerefeldmodelle auf die Bestimmung des stationären Anteils der Ozeanzirkulation haben.

- **Vertikales Referenzsystem.** Die speziell mit GOCE zu erwartende deutliche Verbesserung der globalen Geoidgenauigkeit wird es ermöglichen, ein deutlich verbessertes globales vertikales Höhensystem zu definieren. Hierzu sollen die notwendigen Arbeiten begonnen werden, um einen wesentlichen Beitrag für die Festlegung eines internationalen globalen vertikalen Referenzsystems zu leisten (s. Abschnitt 4.4.4).
- **GOCE Anwenderunterstützung.** Da GOCE ein völlig neuartiges Messsystem darstellt und räumlich deutlich verbesserte globaler Schwerefelder verfügbar sein werden, lassen sich damit neue Anwendungspotenziale erschließen.

4.4.2 Terrestrische Gravimetrie

Die Schweremessungen dienen der Realisierung des Deutschen Schwereferenzsystems und seiner Einbindung in das europäische und das internationale Bezugssystem. Damit wird der nationale Schwerestandard sichergestellt. Für diese Aufgaben werden Messungen mit Supraleitenden Gravimetern (SG) an festen Standorten und Beobachtungen mit transportablen Absolutgravimetern (AG) an variierenden Orten ausgeführt. Mit den Beobachtungen der Absolutgravimeter wird die Schwerebeschleunigung am Messort für eine Messepoche ermittelt und in SI-Einheiten angegeben. Die erzielbare Messgenauigkeit der Absolutschweremessungen liegt bei $20\text{-}30 \text{ nm/s}^2$ (FG5-Absolutgravimeter). Mit den SG werden die zeitlichen Variationen der Schwerebeschleunigung mit einer deutlich höheren Auflösung (ca. 0.1 nm/s^2) bestimmt. Sie dienen damit zur Untersuchung zeitlich variabler Schwereeffekte, unterstützen die Gravimetervergleiche und ermöglichen die Untersuchung von Umgebungseinflüssen, die Entwicklung von Korrekturmodellen und eine Verknüpfung mit anderen Beobachtungsgrößen. Wegen ihrer Sensitivität gegenüber Höhen- und Massenänderungen besitzen die gravimetrischen Messungen eine besondere Bedeutung bei der unabhängigen Überwachung von Höhenänderungen und bei Untersuchungen von hydrologisch bedingten Veränderungen der Umwelt.

Terrestrischen Schweremessungen können im Hinblick auf die räumlichen wie auch die zeitlichen Variationen den Satellitenschwerefeldmodellen gegenübergestellt werden. So eignen sich die präzisen gravimetrischen Zeitreihen aus der Kombination von Absolutgravimetern und supraleitenden Gravimetern für einen Vergleich mit den Schwerefeldmodellen der Satellitenmission GRACE sowie Nachfolgemissionen. Die terrestrischen Messungen leisten einen wertvollen Beitrag für eine amplitudentreue Filterung der Kugelfunktionsentwicklungen. Voraussetzung dafür ist die Überbrückung der unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung durch Analyse von Hauptkomponenten. Weiterhin ist eine Separation nichtrepräsentativer lokaler hydrologischer Einflüsse in den terrestrischen Zeitreihen notwendig. Beide Aspekte sind Zielstellungen des Projektes TASMAGOG im Rahmen der SPP 1257 „Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde“.

Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Entwicklung von Verfahren zum Vergleich von terrestrischen Schweremessungen mit zukünftigen hochauflösenden statischen Schwerefeldmodellen (GOCE). Umfangreiche Absolutschweremessungen aus verschiedenen Quellen, wie wiederholt mit dem FG5-Gravimeter beobachtete Punkte des DSGN94 und GREF, sowie A10-Messungen auf Feldstationen im Rahmen von GOCE-GRAND II und der Modernisierung des DHHN, lassen eine flächenhafte Beurteilung der Schwerefeldmodelle auf dem Gebiet der Bundesrepublik zu. Desweiteren leisten diese Messungen einen wertvollen Beitrag zur Homogenisierung der Datenbasis terrestrischer Schwerepunkte zur Berechnung des Quasigeoides.

Aufbau eines globalen Schwerereferenzsystems

Das IGSN71 „International Gravity Standardization Net 1971“ (Morelli et al. 1974) bildet derzeit noch das gültige Referenzsystem für Schwerebeobachtungen. Die Genauigkeit dieser Festlegung ist als nicht mehr zeitgemäß anzusehen. Heute besteht eine deutliche Diskrepanz zwischen der Realisierung des Schwerereferenzsystems (Unsicherheit $\pm 1 \mu\text{m/s}^2$ bzw. $\pm 100 \mu\text{Gal}$) und den derzeit zur Verfügung stehenden Messinstrumenten zur absoluten Schwerebestimmung. Moderne Absolutgravimeter übertreffen in ihrer Messgenauigkeit die Genauigkeit des Referenzsystems um nahezu zwei Größenordnungen.

Mit der gesteigerten Messgenauigkeit der Absolutgravimeter haben sich verschiedene neue Anwendungen für die Schwerebestimmung ergeben. In der Metrologie ermöglichen sie eine verbesserte Definition von Standards (Watt, Kelvin etc.). Dies wird beispielsweise bei der Realisierung einer Watt-Waage genutzt. In Geodäsie und Geophysik ermöglichen genaue Schwerebestimmungen die unabhängige Überprüfung von Höhenänderungen, die Untersuchung von Massentransporten innerhalb und außerhalb der Erdkruste. Genaue terrestrische Schwerezeitreihen werden damit wichtig für die Verifizierung und Kalibrierung von zeitabhängigen Schwerefeldmodellen derzeitiger Satellitenschwerefeldmissionen. Massentransporte sind zum Beispiel als Folge von Klimaänderungen (Global Change) oder Meeresspiegelvariationen zu beobachten.

Mit seiner Beteiligung an den Vergleichskampagnen der Absolutgravimeter beim BIPM (Bureau International aux Poids et Mesures) trägt das BKG zur Realisierung des globalen Schwerestands bei und ermöglicht die Übertragung dieses Standards auf die nationalen Netze und Referenzstationen (Internationales System der Einheiten - SI).

Die Station Wettzell ist Teil des Deutschen Schweregrundnetzes 1994 (DSGN94), des International Absolute Gravity Basestation Network (IAGBN) (Boedecker und Fritzer 1986) und ist in die kombinierten geodätischen Netze „European Combined Geodetic Network“ (ECGN) und in das „German GNSS Reference Network“ (GREF) eingebunden.

Neben der Station Wettzell steht auch die Schwerereferenzstation Bad Homburg als regionale Vergleichsstation für Absolutgravimeter zur Verfügung. Für beide Stationen stehen genaue gravimetrische Zeitreihen aus der Kombination der Messungen Supraleitender und Absoluter Gravimeter zur Verfügung.

Das GGOS-Projekt (Global Geodetic Observing System) der IAG fordert wiederholte hochgenaue Schweremessungen an den Standorten mit präzisen geodätischen Raumverfahren wie VLBI, SLR, GNSS oder DORIS. Vor allem der zeitunabhängige Bezug der Schwerekomponente erfordert ein konsistentes und langzeitstabiles Schwerereferenzsystem.

Zukünftige Arbeiten sollen dazu beitragen, ein verbessertes Globales Schwerereferenznetz mit internationaler Beteiligung unter dem Schirm des International Gravity Field Service (IGFS) zu schaffen. Wesentliche Komponenten beim Aufbau eines solchen Netzes stellt die Datenbank für Absolutschweremessungen (AGrav) dar und die Einbindung in die „International Working Group for Absolute Gravimetry“ mit den Bestrebungen zur Standardisierung der Schweremessungen dar.

Neben der Bedeutung der terrestrischen Gravimetrie auf Fundamentalstationen für die Erfassung lokaler Komponenten sind Absolutschwere-messungen und Messungen mit supraleitenden Gravimetern für die Kombination mit Schwerefeldparametern aus Satellitenschwerefeldmissionen wichtig. Entsprechende Kombinationsstrategien sind weiterzuentwickeln. Dabei ist die Konsistenz zwischen physikalischen Höhensystemen und

geometrischen Höhen durch optimierte Geoidmodellierung zu verbessern.

4.4.3 Multi-Skalen-Darstellung des Schwerefeldes

Das Gravitationsfeld der Erde wird traditionell durch eine Reihentwicklung in Kugelfunktionen beschrieben. Die zugehörigen Kugelflächenfunktionen bilden eine orthogonale Basis auf einer Sphäre (Kugeloberfläche). Die entsprechenden Reihenoeffizienten, d.h. die Kugelfunktionskoeffizienten, werden aus global vorliegenden Messungen bestimmt. Die Berechnung des Gravitationspotentials oder eines Funktionals $F(P)$ in einem Punkt P im Außenraum der Kugel wird durch eine sphärische Faltung der Funktion $F(Q)$ gegeben in den Quellpunkten Q auf der Sphäre mit dem Poisson-Kern $K_P(P, Q)$ erzielt (Schmidt und Fabert, 2008, Bouman et al. 2010). Liegen die Messungen auf der Sphäre jedoch ungleichmäßig verteilt und/oder mit unterschiedlicher Genauigkeit vor, erweisen sich Kugelfunktionsentwicklungen als ungeeignet. Zur Beschreibung der Funktion $F(P)$ bieten sich dann alternative Reihendarstellungen in sphärischen (radialen) Basisfunktionen an.

Hochauflösende Schwerefelder werden zumeist aus heterogenen regional vorliegenden Messungen bestimmt. Zu diesem Zweck wird der Poisson-Kern durch einen räumlich und spektral lokalisierenden Kern $\Phi_J(P, Q)$ ersetzt, wo J das Auflösungslevel bezeichnet. Das Funktional $F_J(P)$ des Auflösungslevels J kann dann als Faltung von $F(Q)$ mit $\Phi_J(P, Q)$ gerechnet werden. Im Rahmen der Multi-Skalen-Darstellung (MSD) wird der Kern $\Phi_J(P, Q)$ $\phi_J(P, Q)$ als Skalierungsfunktion bezeichnet. Die Funktionale aufeinanderfolgender Auflösungslevel unterscheiden sich durch das Detailsignal $G_J(P)$, d.h., $F_{J+1}(P) = F_J(P) + G_J(P)$. Das Detailsignal wiederum kann geschrieben werden als Linearkombination sphärischer Wavelet-Funktionen $\Psi_{j,k}(P, Q_{j,k})$ mit Koeffizienten $c_{j,k}$ und Knotenpunkten $Q_{j,k}$ eines geeigneten Gitters. Wird die Funktion $F(P)$ mit dem Gravitationspotential identifiziert, bedeutet die Modellierung von F mittels der MSD die Schätzung der Koeffizienten $c_{j,k}$ aus Schwerefeldbeobachtungen (Schmidt et al. 2007). Die entsprechenden Detailsignale bedeuten Bandpassfilterungen des Potentials.

Da die Funktion $F(P) \approx F_J(P)$ als Summe von Detailfunktionen aufsteigender Auflösungslevels geschrieben werden kann

$$F_J(P) = F_{j_0}(P) + \sum_{j=j_0}^{J-1} G_j(P)$$

können die Skalierungs- und Waveletkoeffizienten $d_{j,k}$ und $c_{j,k}$ verschiedener Auflösungslevels mittels eines pyramidalen Algorithmus verknüpft und vom höheren zum niedrigeren Level, d. h. vom Feineren ins Größere berechnet werden, s. Abbildung 4.7 (Schmidt et al. 2007). Im „nullten“ Schritt werden im Rahmen einer Parameterschätzung die Skalierungskoeffizienten aus Beobachtungen bestimmt. Wurden diese aus verschiedenen geodätischen Beobachtungsverfahren gewonnen, lassen sich die unbekannt Koeffizienten aus einer Kombinationslösung bestimmen. Die unterschiedlichen Genauigkeiten der verschiedenen Verfahren können dabei durch eine Varianzkomponentenschätzung berücksichtigt werden. Abbildung 4.8 zeigt die MSD der Differenz aus Faye-Anomalien und EGM96 bis Grad und Ordnung 120 im nordwestlichen Teil Südamerikas.

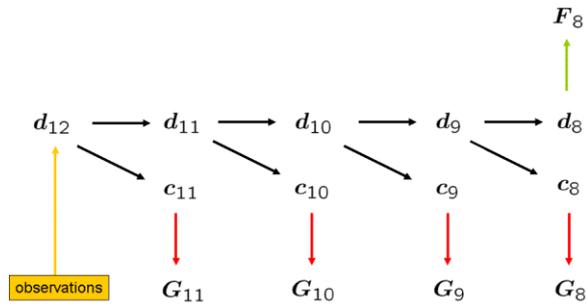


Abbildung 4.7: MSD mittels pyramidalen Algorithmus; aus den Skalierungskoeffizienten des Levels $j+1$ werden die Skalierungs- und Wavelet-Koeffizienten des Levels j berechnet. Die Koeffizienten d_j werden in der „nullten“ Stufe aus einer Parameterschätzung bestimmt.

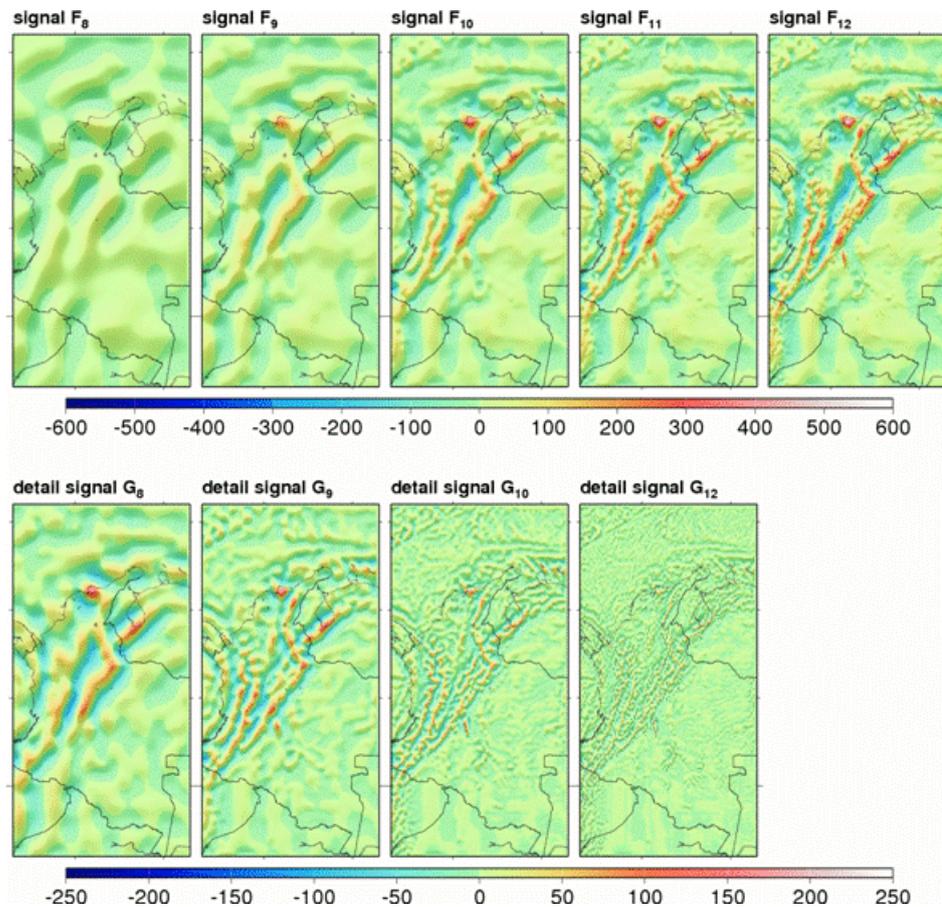


Abbildung 4.8: MSD von Faye-Anomalien in Südamerika, alle Daten in mGal; siehe Schmidt et al. (2007). Das Eingangssignal ist die Differenz zwischen Faye-Anomaliebn und EGM96 bis Grad und Ordnung 120.

Algorithmen wie der oben beschriebene sollen weiterentwickelt und ihre Eigenschaften studiert werden. Ziel ist, diese an die spezifische Problemstellung der Darstellung von regionalen hochaufgelösten Schwerfeldern anzupassen, um Messdaten mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen optimal zu kombinieren. Zudem sollen daraus geeignete Algorithmen zur Kompression von Schwerfeldern abgeleitet werden.

4.4.4 Höhensysteme

Stand der Forschung

Die Bestimmung von Schwerfeld- bzw. Geoidmodellen basiert sowohl auf geometrischen als auch auf physikalischen, zeit- und ortsabhängigen Messgrößen. Zur Modellierung des gesamten Spektrums des Erdschwe-

refeldes benötigt man verschiedene Beobachtungsfunktionale: Daten aus Satellitenschwerefeld- und Satellitenaltimetermissionen (siehe 4.4 und 4.3), terrestrische Schwerefeldbeobachtungen (siehe 4.4.2) einschließlich Höhenanomalien aus GNSS-/Nivellementsmessungen, see- und aero-gravimetrische Daten und digitale Geländemodelle. Alle Beobachtungsfunktionale sollten sich auf der Grundlage konsistenter Konventionen auf ein einheitliches Referenzsystem beziehen.

Die Weiterentwicklung bestehender und Entwicklung neuer Satellitenpositionierungssysteme (z.B. Galileo) sowie die Etablierung von Positionierungsdiensten ermöglichen eine zunehmend höhere Genauigkeit und Verfügbarkeit bei der statischen und kinematischen Positionsbestimmung. Durch die Nutzung moderner Datenübertragungsmöglichkeiten können geometrische Positionierungsdaten in Echtzeit übertragen werden. Die Genauigkeit, Verfügbarkeit und Operationalität der Verfahren sind wichtige Kriterien, die zu einem immer breiteren Nutzerkreis der satellitengestützten Positionsbestimmung führen. In zunehmendem Maße gewinnt dabei die Höhenkomponente an Bedeutung. Eine umfassende Nutzung der satellitengestützten Höhenbestimmung in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen der Wissenschaft und Praxis setzt die Transformation der satellitengeodätisch bestimmten und geometrisch definierten Höhen in physikalische Höhen, die sich auf das Schwerefeld der Erde beziehen, voraus. Für eine moderne Realisierung eines physikalischen Höhensystems ist deshalb neben den auf den klassischen Verfahren der Höhenbestimmung beruhenden Höhennetzen, die Verfügbarkeit einer adäquaten physikalischen Höhenbezugsfläche, des Geoids bzw. Quasigeoids, eine wichtige Komponente.

In Deutschland entstehen derzeit neue absolutgravimetrische Netze mit mehr als 200 AG Feldstationen. Ein Teil dieser Punkte verknüpft Höheninformationen aus GNSS, Feinnivellement und Schweremessungen mit A10 Feldgravimeter. Die Stationen leisten damit einen wichtigen Beitrag zur Stabilisierung des Höhenreferenzsystems und zur verbesserten Geoidmodellierung.

Die Georeferenzierung der Höhenkomponente von Datensätzen basiert heute auf verschiedenen Realisierungen der nationalen und regionalen Höhensysteme. Unterschiede im Niveau der nationalen Höhensysteme können im Dezimeter- bis Meterbereich liegen. Inkonsistenzen dieser Größenordnung sind für viele wissenschaftliche und praktische Anwendungen nicht akzeptabel. Sie müssen deshalb bei der Nutzung von Datensätzen unterschiedlicher Länder oder Regionen beachtet werden. Um Informationen hierzu bereitstellen zu können, wird an der Definition und Realisierung eines einheitlichen globalen Höhenreferenzsystems gearbeitet. Ein hochgenaues globales Geoid- und Schwerefeldmodell bildet hierfür die entscheidende Grundlage (Ihde, Sánchez 2005, Sanchez, 2009, Sanchez und Bosch, 2009).

Forschungsziele

Der Zeitraum der nächsten 5 Jahre wird maßgeblich von den Ergebnissen der Satellitenschwerefeldmission GOCE geprägt sein. In Kombination mit den Ergebnissen anderer Satellitenmissionen werden globale „satellite-only“ Geopotentialmodelle des Schwerefeldes bestimmt werden können, die es erlauben, Reihenentwicklungen des Gravitationspotentials nach Kugelfunktionen bis ca. Grad und Ordnung 200 vorzunehmen. Durch deren Einbeziehung wird eine neue, bislang nicht erreichte Qualität bei der Modellierung des langwelligen statischen Schwerefeldanteils erreicht werden.

Jedoch sind höherfrequente Einflüsse, die mit GOCE nicht erfasst werden können, nicht vernachlässigbar. Deshalb wird international an hochauflösenden globalen Schwerefeldmodellen gearbeitet, die eine Kombi-

nation aus den Daten der Satellitenschwerefeldmissionen, aus der Altimetrie und von terrestrischen Schwerefeldbeobachtungen vornehmen. Hervorzuheben ist in dieser Hinsicht das globale Modell EGM2008 (Pavlis et al. 2008), das formal eine räumliche Auflösung von ca. 10 km liefert. D.h. Wellenlängen von ca. 20 km werden von diesem Modell aufgelöst, sofern die in dieses Modell eingeflossenen Daten diese räumliche Auflösung haben. Für präzise regionale und lokale Modellierungen des Geoids im Bereich weniger Kilometer werden auch zukünftig regionale Schwerefeldmodelle erforderlich sein.

Neben der Verbesserung der Datengrundlage ist eine Weiterentwicklung der Methoden und Modellansätze zur Ableitung der Schwerefeldmodelle notwendig, die eine rigorose Kombination der Beobachtungsgrößen erlauben. Dabei ist es zum einen erforderlich, die in unterschiedlichen Höhen gemessenen Daten (in Höhe der Satelliten, in Flugzeughöhe bzw. auf der Erdoberfläche) möglichst direkt und hypothesenfrei zu berücksichtigen. Zum anderen sind insbesondere die neuartigen Beobachtungsfunktionale der Satellitenmission GOCE – die zweiten Ableitungen des Gravitationspotentials – in Kombination mit den bisherigen Beobachtungstypen konsistent zu modellieren.

Für das Gebiet Deutschlands zeichnet sich im Zeitraum der nächsten 5 Jahre eine besondere Situation ab. Mit dem durch die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen (AdV) initiierten Projekt zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhensystems (DHHN) werden die Grundlagen für eine moderne Realisierung des Höhensystems gelegt. Das Projekt umfasst neben der nivellitischen Überprüfung großer Teile des Höhennetzes 1. Ordnung, die Bestimmung ellipsoidischer Höhen an mehr als 250 Nivellementsunkten sowie die Durchführung von Absolut-schweremessungen an 100 Punkten. Die Messungen wurden sehr sorgfältig geplant und durchgeführt und werden nach einheitlichen Kriterien ausgewertet. Die im Rahmen des Projektes erhobenen Messgrößen, sind sowohl hinsichtlich der Homogenität und Konsistenz der Messungen und der verwendeten Bezugssysteme als auch hinsichtlich der einheitlichen Epoche der Beobachtungen beispielgebend. Die Ergebnisse der Erneuerung des DHHN und der Satellitenschwerefeldmissionen ermöglichen die Überprüfung des derzeitigen Höhensystems von Deutschland und bieten die Grundlage zur Einführung eines neuen amtlichen Höhensystems. Die GOCE-Schwerefeldmodelle können hier insbesondere dazu beitragen, mögliche langwellige Fehler des Höhensystems aufzudecken, die aufgrund der speziellen Fehlercharakteristik des Nivellements möglich sind. Gleichzeitig erlauben die Ergebnisse dieses Projektes die Satellitenschwerefeldmissionen zu verifizieren und konsistente hochfrequente Geoid- und Schwerefeldmodelle zu bestimmen.

4.4.5 Forschungsziele

Ein Schwerpunkt der Arbeiten in der neuen Berichtsperiode bildet die Verarbeitung der Daten des Satelliten GOCE und die Interpretation der abgeleiteten Resultate. Entscheidend für die Berechnung des Schwerefeldes sind eine detaillierte Analyse aller Prozessierungsschritte der Verarbeitungskette und ein vertieftes Verständnis in Theorie und Anwendung der verschiedenen Sensoren. Neben Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung bekannter Beobachtungstechniken sollen neuartige Beobachtungskonzepte entwickelt werden als Beitrag zur Realisierung zukünftiger Schwerefeldsatellitenmissionen. Die Erstellung hochauflösender regionaler und globaler Schwerefeldmodelle erfordert eine rigorose und möglichst hypothesenfreie Kombination von Schwerebeobachtungen unterschiedlicher Sensoren im Weltraum, auf Flugzeugen und am Erdboden. Entsprechende Methoden und Modellansätze sowie alternative Darstellungsformen und Algorithmen zur Lösung großer Ausgleichungsaufgaben sind weiterzuentwickeln. Auf der Anwendungsseite werden Strategien zur

Nutzung globaler und regionaler Schwerefelder in der Erdsystemforschung entwickelt. Die FGS trägt zur Realisierung eines globalen und langzeitstabilen Schwerestandards durch regelmäßige Absolutschweremessungen und Beteiligung an Vergleichskampagnen der Absolutgravimeter bei. Verfahren zum Vergleich von terrestrischen Schweremessungen mit zukünftigen hochauflösenden statischen Schwerefeldmodellen werden entwickelt. Schließlich beteiligt sich die FGS an der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes.

4.5 Tabellarische Zusammenfassung der Ziele

Geodätische Punktfelder

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Referenzsysteme	Rigoreose Kombination der Raumverfahren; Konsistenz zwischen TRF, EOPs, CRF und Erdschwerefeld in Hinblick auf GGOS; Realisierung unverzerrter Referenzsysteme	Entwicklung von Strategien zur Kombination der Beobachtungstechniken unter optimaler Ausnutzung von deren Stärken Untersuchung optimaler Datumsbedingungen Untersuchung des Einflusses der Netzgeometrie und Gewichtung der Verfahren Einschluss niedriger Terme des Erdschwerefeldes Untersuchung technik-spezifischer Biases Nutzung der Möglichkeit zur Reanalyse grosser Datenmengen
Referenzsysteme	Verknüpfung der Verfahren	Entwicklung von Strategien zur Auswahl geeigneter Stationen zur Verknüpfung der Verfahren Untersuchung des Potentials alternativer Möglichkeiten zur Verknüpfung auf Satelliten und dem Mond
Referenzsysteme	verbesserte Parametrisierung der zeitabhängigen Stationspositionen	Untersuchung alternativer Parametrisierungen von Stationsbewegungen Schätzen von Parametern physikalischer Modelle der Stationsbewegungen
Referenzsysteme	Nutzung neuer GNSS	Untersuchung des Einflusses der neuen Systeme auf die Realisierung der Referenzsysteme Analyse des Einflusses des Umbaus des globalen GPS Netzes in ein GNSS Netz auf das Referenzsystem
Referenzsysteme	Kombination auf Beobachtungsstufe	Weiterentwicklung der Methodik zur Kombination der Verfahren auf Beobachtungsstufe und Einführung in die praktische Nutzung Untersuchung des Potentials der Kombination auf Beobachtungsstufe, insbesondere der Verknüpfung von Uhrenparametern

Punktpositionierung	Verbesserung der physikalischen Modellierung der Beobachtungen und der Hintergrundmodelle	weitere Untersuchung aller Fehler- einflüsse auf die gesamten Mess- vorgänge Entwicklung verbesserter Iono- sphären- und Troposphären- modelle Untersuchung atmosphärischer Auflastmodelle Verbesserung der GNSS Bahnmo- delle
Punktpositionierung	Nutzung neuer GNSS	Simulationsstudien zur optimalen Konfiguration der Mess-größen Untersuchung und Berücksichti- gung der Biases zwischen den Systemen Untersuchung des Potentials stabi- ler Uhren für GNSS und Entwick- lung geeigneter Uhrenmodelle
Punktpositionierung	echtzeitnahe Positionierung	Standardisierung der Datenströme im Rahmen von RTCM Echtzeit-Monitoring der Datenquali- tät der Stationen Beteiligung an Echtzeit-Aktivitäten von IGS, EUREF

Orientierung und Rotation der Erde

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Langzeitstabilität	Verbesserung der Genauigkeit und Langzeitstabilität der Erdrotationspa- rameter	Untersuchungen zur optimalen Parametrisierung und optimalem Einsatz von constraints Untersuchungen zu Systematiken in VLBI-Erdrotationsergebnissen in Abhängigkeit von Netzwerkkonstel- lationen
hochauflösende Erdro- tationsparameter	Verbesserung der Qualität hochauf- gelöster Erdrotationsparameter	konsistente Kombination von VLBI und GNSS zur Bestimmung hoch- aufgelöster Erdrotationsparameter Studium des Einflusses unter- schiedlicher Umlaufzeiten der GNSS Satelliten Kombination hochaufgelöster Erd- rotationsparameter aus Weltraum- verfahren und Ringlaserdaten
Echtzeitnahe Parame- terbestimmung	Reduzierung der Latenzzeit bei der Bereitstellung von Erdrotationspa- rametern	Entwicklung automatisierter Ana- lysetools und Datenspeicherungs- verfahren

Meeresoberfläche

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Zeitreihen	Ausbau und Pflege der Altimeter Datenbestände	Implementierung der Schnittstellen für neue Missionen Harmonisierung der Daten konsistente Kalibrierung und Kombination der Zeitreihen Sicherstellung des einheitlichen Bezugs zum Geozentrum Unterhalt eines Web-Interfaces für interne und externe Nutzer
Kinematik des Meeresspiegels	Analyse und Beschreibung regionaler und globaler Meeresspiegeländerungen	Zeitreihenanalysen, Frequenz- und EOF-Analysen Vergleich mit langjährigen Pegelmessungen Rekonstruktion der historischen Meeresspiegelentwicklung Bereitstellung konsolidierter Produkte zum Meeresspiegelanstieg
Gezeitenanalyse	Verbesserung der empirischen Gezeitenanalyse	Verbesserte Trennung von Partialtiden durch längere Zeitreihen und Daten neuer Missionen Kombination mit GRACE Gezeitenanalysen Ableitung neuer globaler Gezeitenmodelle mit Fehlerabschätzung
hochauflösende Schwerefeldstrukturen	Kombination von GRACE und GOCE mit Satellitenaltimeterdaten	Gleichzeitige Schätzung von Geoid und dynamischer Ozeantopographie Vergleich von Schweregradienten von GOCE und aus Altimetrie
Sterischer Effekt	Separation von Massen- und Volumeneffekte von Meeresspiegelvariationen	Untersuchung zur Abschätzung des sterischen Effekts Nutzung von Klimatologien Ocean Bottom Pressure Variationen aus numerischen Modellen Nutzung von GRACE Daten und ARGO-floats
Sensorik	Nutzung neuer Sensor-Technologien	Aufbau der Expertise für neue Sensortechnologie (delay Doppler, wide swath altimetry, GPS reflectometry) Nutzung zur Vermessung kontinentaler Eisflächen und Meereis Beiträge zur Abschätzung aktueller Eismassenverluste von Antarktis, Grönland und Gletscherregionen

Schwerefeld

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Satellitengravimetrie	Sensoranalyse	detaillierte Analyse aller Prozessierungsschritte der GOCE Datenverarbeitung Vertiefung des Verständnisses in Theorie und Anwendung der verschiedenen Sensoren zur Beobachtung des Schwerefelds
Satellitengravimetrie	Zukunftsmissionen	Entwicklung neuartiger Beobachtungskonzepte und entsprechender Simulationsprozesse Mitarbeit an nationalen und internationalen Programmen
Satellitengravimetrie	Nutzung von Schwerefeldmodellen	Entwicklung von Anwendungsstrategien zur Nutzung von globalen und regionalen Schwerefeldern in der Erdsystemforschung
Satellitengravimetrie, terrestrische Gravimetrie	Erstellung hochauflösender regionaler und globaler Schwerefeldmodelle	Entwicklung alternativer Darstellungsformen des Schwerefeldes Entwicklung von Algorithmen zur Lösung großer Ausgleichungsaufgaben Kombination von Schwerefelddaten verschiedener Missionen und terrestrischer Messungen
Terrestrische Gravimetrie	Aufbau eines globale Schwerereferenzsystems	Beteiligung an Vergleichskampagnen der Absolutgravimeter Entwicklung von Verfahren zum Vergleich von terrestrischen Schweremessungen mit zukünftigen hochauflösenden statischen Schwerefeldmodellen
Höhensysteme	Kombinierte Referenzsysteme	Weiterentwicklung der Methodik und Modellansätze zur rigorosen Kombination der Daten der Satellitenschwerefeldmissionen, der Altimetrie und von terrestrischen Schwerefeldbeobachtungen Beteiligung an der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes

5 Verbindung mit Erdwissenschaften (Erdsystemforschung)

Neben der Bereitstellung von Beobachtungen trägt die Geodäsie über numerische Modellierung zur Erdsystemforschung bei und macht die metrologische Grundlage zur Beschreibung von dynamischen Prozessen im System Erde verfügbar. Geodätische Messung und Prozesse im Erdsystem hängen über eine wechselseitige Beziehung eng zusammen (s. Abbildung 5.1: Wechselseitige Beziehung zwischen den geodätischen Verfahren (links) und den Komponenten des Systems Erde (rechts) über die geodätischen Parametergruppen (mitte). (Rothacher, 2008). Abbildung 5.1): Geometrische Messverfahren erlauben die Vermessung von Deformationen der Erdkruste infolge von Auflasteffekten oder Landhebungsprozessen, der Veränderungen des Meeresspiegels und der Variationen der Rotation der Erde. Mit den heutigen Satellitensensoren können Massenverlagerungen direkt gemessen, mithin "gewogen" werden. Die gemessenen Veränderungen wiederum sind Ausdruck von Prozessen, welche im System Erde ablaufen, zu deren Verständnis die geodätischen Messzeitreihen beitragen. Theoretische und numerische Modelle der dynamischen Prozesse im Erdsystem erlauben es auf der anderen Seite, die geodätischen Messzeitreihen zu interpretieren. Dies vermittelt wiederum Impulse, um innovative Technologien der Datenerfassung und Analysemethoden zu entwickeln

Die Wechselwirkung zwischen Beobachtungsverfahren und Erdsystemmodellen findet also in beide Richtungen statt: (1) Innerhalb der FGS erzeugte Resultate tragen zum Verständnis der Prozesse im System Erde bei und werden in Erdsystemmodelle assimiliert. (2) In den Arbeiten der FGS werden Modelle verwendet, welche Komponenten des Erdsystems beschreiben, z.B. Modelle bezüglich Troposphärenrefraktion oder Auflasten.

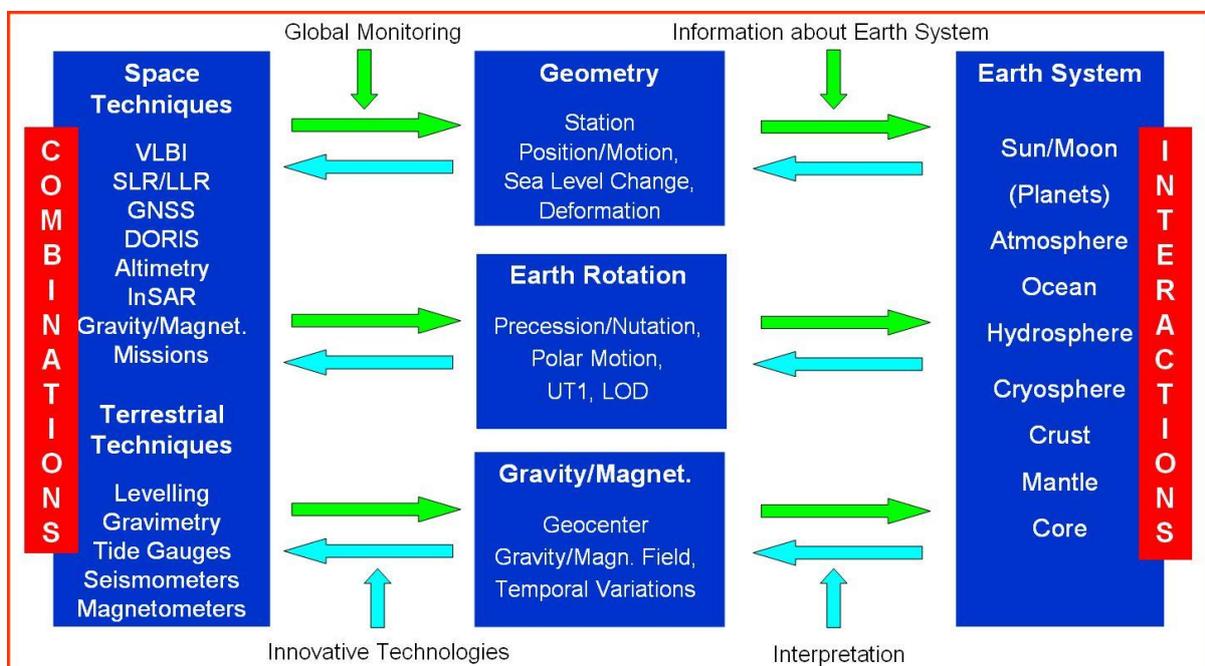


Abbildung 5.1: Wechselseitige Beziehung zwischen den geodätischen Verfahren (links) und den Komponenten des Systems Erde (rechts) über die geodätischen Parametergruppen (mitte). (Rothacher, 2008).

Die Erstellung und Weiterentwicklung von mathematischen und physikalischen Modellen ist ein fundamentales theoretisches Werkzeug zur Erforschung von Zusammenhängen im Erdsystem. In der Modellierung lassen sich die komplexen Prozesse im Erdsystem qualitativ und quantitativ

beschreiben. Zwischen den einzelnen Systemkomponenten treten vielfache Wechselwirkungen und Rückkopplungen auf, die sich nur mit Hilfe von Modellen adäquat untersuchen lassen. Um geodätische Parameterzeitreihen physikalisch zu interpretieren, werden die Beiträge spezifischer dynamischer Prozesse zu den beobachteten Signalen erforscht und die beobachteten Variationen auf diese Weise in einzelne ursächliche Vorgänge im Erdsystem getrennt. Hierzu werden theoretische und numerische Modelle entwickelt, die dynamische Prozesse im Erdsystem mit den geodätischen Parametern verknüpfen. Dies ist eine anspruchsvolle und interdisziplinäre Aufgabe, welche nur durch eine enge Kooperation mit Geophysikern und Geologen, Glaziologen, Ozeanographen, Hydrographen und Atmosphärenphysikern gelingen kann. Die FGS arbeitet bereits in verschiedenen Projekten eng mit Erdwissenschaftlern zusammen. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit soll weiter verstärkt werden.

5.1 Geophysikalische Hintergrundmodelle

Physikalische Modelle spielen in der Geodäsie eine dreifache Rolle (Abbildung 5.2). Sie dienen

- zur Reduktion unerwünschter Effekte in geodätischen Messungen,
- zur Parametrisierung physikalischer Modelle für die geodätische Schätzung,
- zur Reduktion der geodätisch geschätzten Parameter.

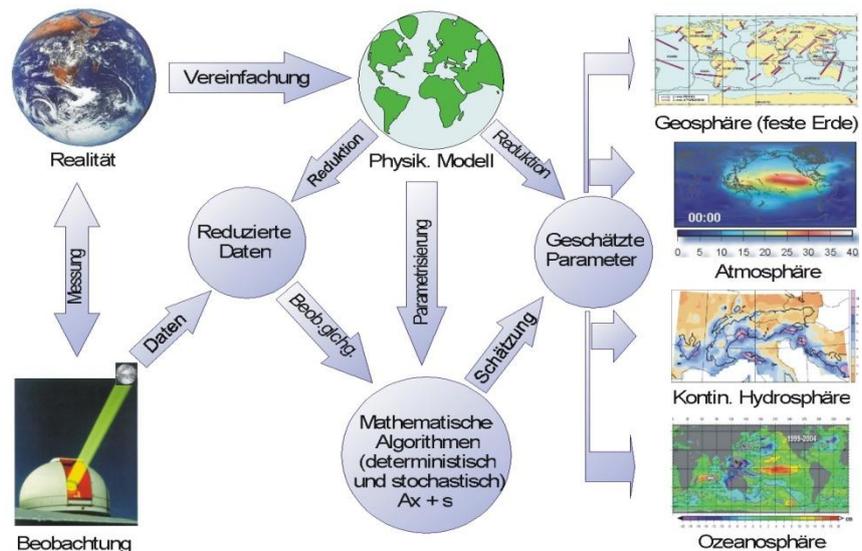


Abbildung 5.2: Stellung physikalischer Modelle in der geodätischen Parameterschätzung

Die geodätischen Messungen erfassen immer die physische Realität. Um diese mathematisch beschreiben zu können, werden vereinfachende physikalische Modelle erstellt und durch schätzbare Parameter mathematisch formuliert. Effekte, die in den Messungen enthalten, in den parametrisierten Modellen aber nicht erfasst sind, werden durch zusätzliche physikalische Modelle reduziert. Ein Beispiel sind Gezeiteneffekte, deren Einschluss in die zu schätzenden Parameter eine sehr hohe zeitliche Auflösung erfordern würde. Sie werden deshalb vorab von den Messungen reduziert. Nach der Schätzung der Parameter mit mathematischen Algorithmen werden darin enthaltene Effekte, die nicht dargestellt werden sollen, durch weitere physikalische Modelle von den Parametern reduziert. Beispiele sind langandauernde oder periodische (z.B. jahreszeitliche) Erscheinungen, die das darzustellende Modell so sehr überlagern, dass kleinere Variationen nicht mehr erkennbar wären.

Die Entscheidung, ob Effekte mit physikalischen Modellen vorab aus den Messungen reduziert oder in die Parameterschätzung eingeführt werden sollen, hängt im Wesentlichen von der Genauigkeit der Modelle ab. Grundsätzlich sollten nur solche Effekte reduziert werden, die besser modelliert werden können als die Messgenauigkeit der geodätischen Verfahren. Dadurch wird gewährleistet, dass die präzisen Messungen nicht durch fehlerhafte Reduktionen verfälscht werden. Andererseits ist bei der Einführung von Modellparametern in die Schätzung sicherzustellen, dass keine anderen, korrelierten Effekte durch die Parameter aufgefangen werden und keine Überparametrisierung entsteht. Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten ist deshalb die genaue Analyse sämtlicher verwendeter Modelle.

Die gebräuchlichsten physikalischen Modelle zur Reduktion der Messungen oder zur Parameterschätzung sind

- für astronomische Parameter
 - Nutation
 - Erdrotation (Polbewegung, UT1 bzw. LOD)
 - Spezielle und allgemeine Relativität
 - Strahlungsdruck der Sonne
 - Erdalbedo und Infrarotstrahlung
- für Parameter der Geosphäre (feste Erde)
 - Erdzeiten (Schwerewirkung auf Satellitenbahnen)
 - Erdzeiten (Deformation der Erde)
 - Polzeiten (Schwerewirkung auf Satellitenbahnen)
 - Polzeiten (Deformation der Erde)
 - Elastizitätsparameter (Lovesche Zahlen)
- für Parameter der Atmosphäre
 - Ionosphäre (Laufzeitverzögerung elektromagnetischer Wellen)
 - Troposphäre (Laufzeitverzögerung elektromagnetischer Wellen)
 - Troposphäre (Abbildungsfunktion schräg einfallender Wellen)
- für Parameter der Hydrosphäre (einschließlich Ozeane)
 - Ozeanzeiten (Schwerewirkung auf Satellitenbahnen)
 - Ozeanzeiten (Auflastdeformation)

Zur Reduktion der geschätzten Parameter werden häufig die folgenden Modelle genutzt:

- für die Geosphäre (feste Erde)
 - Plattentektonik (Oberflächengeschwindigkeiten)
 - Deformationen an Plattengrenzen („Strain“)
 - Glazialer isostatischer Ausgleich (GIA)
- für die Atmosphäre
 - Luftdruck (Auflastdeformation der Erde)
 - Luftdruck und Winde (Drehimpulsänderungen)
- für die Hydrosphäre (einschließlich Ozeane)
 - Ozeanströmung (Meeresoberflächentopographie)
 - Ozeanströmung ((Drehimpulsänderungen)
 - Kontinentale Hydrologie (Auflastdeformation)

Sämtliche Modelle müssen einer durchgreifenden Analyse bezüglich ihrer Zuverlässigkeit und Genauigkeit unterzogen werden. Danach muss entschieden werden, ob die Modelle zur Reduktion der geodätischen Messungen verwendet werden können, oder ob neue Parameter der Modelle aus den geodätischen Messungen zu schätzen sind.

Ein Ziel der hier beschriebenen Forschungsarbeiten ist es, die physikalischen Modelle, soweit sie nicht den Genauigkeitsanforderungen der geodätischen Messungen entsprechen, durch die Schätzung bestangepasster Parameter zu verbessern. Dies gilt insbesondere für die Modelle der Plattenkinematik und Deformation zwischen den Platten, der Ionosphäre sowie der Ozeangezeiten und -strömungen. Die Geodäsie kann damit einen Beitrag zur interdisziplinären Forschung im System Erde leisten. Entscheidend ist ein tiefgreifendes Verständnis dieser oft sehr komplexen Modelle und deren wechselseitigen Beziehungen (z.B. Kopplung von Atmosphären- und Ozeanmodellen), um eine konsistente Verwendung in der Geodäsie zu garantieren und zur Verbesserung der Modelle beizutragen. Zur Förderung dieser interdisziplinären Interaktion unterhält die FGS im Rahmen verschiedener Projekte bereits enge Beziehungen z.B. zum Alfred Wegener Institut (AWI) in Bremerhaven und zum GeoForschungsZentrum in Potsdam.

5.2 Atmosphäre

Die geodätischen Raumverfahren basieren auf Laufzeitmessungen von elektromagnetischen Signalen, welche auf ihrem Weg vom Raum zum Erdboden oder vom Erdboden in den Weltraum die Erdatmosphäre durchdringen müssen. Damit ist die geodätische Messung unmittelbar durch die atmosphärische Refraktion verursachte Signalverzögerung beeinflusst. Ionosphärische Verzögerungen können im optischen Spektralbereich vernachlässigt werden und wirken sich im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums dispersiv aus. Damit können sie eliminiert werden, wenn Beobachtungen auf zwei oder mehr Frequenzen verfügbar sind. Troposphärische Verzögerungen müssen sowohl im optischen wie im Mikrowellenbereich modelliert werden. Für Verzögerungen von Mikrowellen (GNSS, VLBI) werden heute hydrostatische Modelle und Mappingfunktionen verwendet, welche auf mehrmals pro Tag aufdatierten Wettermodellen beruhen (Böhm et al., 2006). Ein präzises Verständnis dieser Hintergrundmodelle und damit ein Austausch mit den Meteorologen, welche diese Modelle zur Verfügung stellen, ist unerlässlich, um die erforderliche Information unverzerrt zu extrahieren.

Auf der anderen Seite hat die Sensitivität der Raumverfahren auf atmosphärische Einflüsse zur Folge, dass diese als Sensoren zur Messung atmosphärischer Parameter verwendet werden können. Damit können als Resultate der geodätischen Verfahren – sozusagen als Nebenprodukt – wertvolle Informationen den Atmosphärenphysikern bereitgestellt werden. Mit GNSS-Stationsnetzen kann insbesondere die horizontale Verteilung von atmosphärischem Wasserdampf gemessen werden und meteorologischen Anstalten zur Assimilation in Wetterprognosemodelle zur Verfügung gestellt werden. Verfahren können sich auch gegenseitig unterstützen. So können beispielsweise mit GNSS Troposphärenparameter gemessen und zur Korrektur von SAR und InSAR-Aufnahmen verwendet werden.

Geodätische Verfahren eignen sich auch, um ionosphärische Parameter zu bestimmen. Sie können damit einen Beitrag zur Überwachung des sogenannten "Space Weather" leisten. Während in der geodätischen Anwendung heute nur die Laufzeitverzögerung der elektromagnetischen Signale im Vordergrund steht, die im Allgemeinen im Zenit modelliert und dann durch einfache mathematische Funktionen auf beliebige Höhenwinkel übertragen wird, soll im Rahmen der FGS ein vollständiges vierdimensionales (Raum-Zeit-) Modell der Elektronendichte erstellt werden. Als Grundlage dienen die physikalischen Modelle (z.B. die International Reference Ionosphere, IRI, der NASA), deren Parameter aus geodätischen Beobachtungen (GNSS, VLBI, DORIS, Altimetrie, Okkultationsmessungen) verbessert werden können. Aus solchen verbesserten Modellen lassen sich mit geeigneten hoch auflösenden Darstellungsmetho-

den die für die geodätischen Beobachtungen erforderlichen Reduktionsgrößen besser ableiten. Zur Parametrisierung dieser Beobachtungen werden Reihenentwicklungen in Tensor-Produkten aus Kugelflächenfunktionen, empirischen Orthogonalfunktionen (EOF) und/oder Splines (sogenannte B-Splines) als Basisfunktionen genutzt. Im Gegensatz zu globalen Ansätzen mit Kugelflächenfunktionen werden bei einem solchen regionalen Ansatz nur die Gebiete berücksichtigt, in denen tatsächlich auch Beobachtungen vorliegen, was die Genauigkeit der Modelle bei unregelmäßig verteilten Eingangsdaten erheblich steigert. Neben der Lokalisierung zeichnen sich B-Spline-Ansätze auch dadurch aus, dass sich daraus Funktionenfamilien (Skalierungsfunktionen und Wavelets) konstruieren lassen, die die Betrachtung eines Signals unter verschiedenen Auflösungen ermöglichen. Die Zerlegung der Elektromendichte in eine Summe bandpassgefilterter Signalkomponenten entspricht einer sukzessiven Tiefpassfilterung und wird als Multiskalen-Darstellung (MSD) bezeichnet (Schmidt, 2007, Schmidt et al., 2007, Zeilhofer, 2008)

Um möglichst zeitnahe Ionosphärenmodelle abzuleiten, soll die Kalman-Filter-Technik zum Einsatz kommen. Dieses Verfahren der sequentiellen Parameterschätzung ermöglicht neben echtzeitnahen Aussagen über die Ionosphärenaktivität auch die Prädiktion der Ergebnisse in die Zukunft und ist damit eine Grundvoraussetzung für die Nutzung des Modells für Echtzeit-Positionierungsaufgaben.

5.3 Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde

DFG Schwerpunktprogramm Massentransporte

Das von der DFG im Jahre 2006 begründete Schwerpunktprogramm SPP 1257, Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde, wird 2011 die dritte und letzte zweijährige Förderphase durchlaufen. In den ersten vier Jahren waren fast alle Mitglieder der FGS maßgeblich an dem Schwerpunktprogramm beteiligt und werden sich mit Folge- und Neuanträgen um Förderung bis Ende 2012 bewerben.

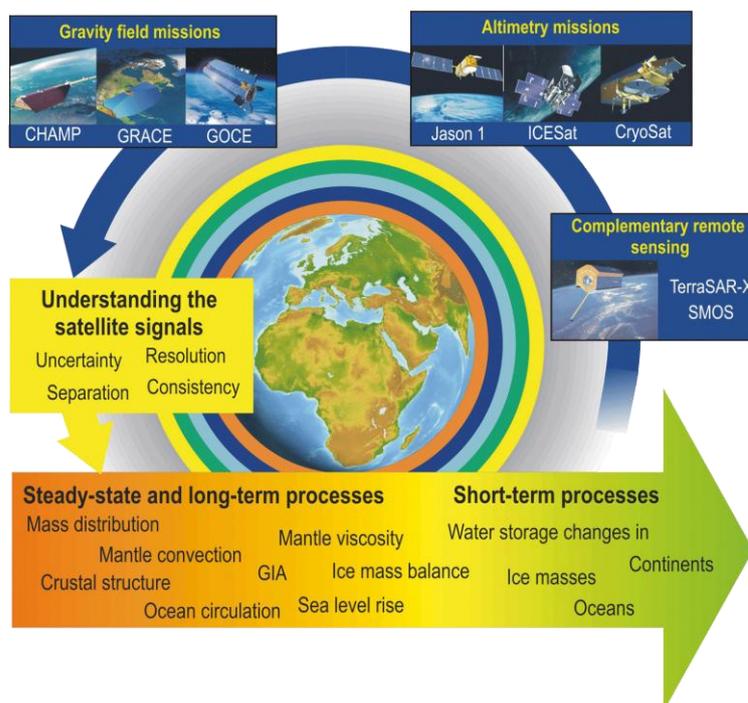


Abbildung 5.3: Die aktuelle Struktur des SPP1257 für die abschließende Förderphase bis 2012

Die allgemeine Zielsetzung des Schwerpunktprogramms besteht in der Aufgabe, Verteilung und Transporte von Massen im System Erde durch die Nutzung der Daten neuartiger Schwerefeld- und Altimetermissionen genauer und besser als je zuvor zu beschreiben. Die zurzeit einmalige Konstellation gleichzeitig realisierter Raumverfahren für Schwere und Oberflächengeometrie (CHAMP, GRACE und GOCE einerseits sowie ENVISAT, Jason-2, ICESat, und CryoSat-2 andererseits) bietet dafür die besten Voraussetzungen. Zu der synoptischen Datengewinnung durch Raumverfahren gibt es kein terrestrisches Äquivalent.

Die Synergien der jetzt verfügbaren Raumverfahren lässt erwarten, dass

- erstmals die Beschreibung von absoluten Transporten im Ozean gelingt,
- regionale und globale Wasserbilanzen geschlossen werden können durch eine genauere Beobachtung kontinentaler hydrologischer Speicher,
- Änderungen der polaren Eisbedeckung und ihrer Wechselwirkung mit dem globalen Meeresspiegelanstieg erkannt werden
- und sich bisher nicht detektierbare Massenverlagerungen in Kruste und Mantel ableiten lassen.

Diese Zielsetzungen sind für zukünftige Klimaprognosen von höchster Relevanz, erfordern aber einen multi-disziplinären Ansatz. Folgerichtig arbeiten im SPP1257 Hydrologen, Glaziologen, Ozeanographen, Geophysiker, Geodäten und Mathematiker gemeinsam an einem besseren Verständnis der Prozesse im Erdsystem.

In den ersten Jahren des Schwerpunktprogramms wurden Forschungsprojekte primär aus disziplinorientierten Fragestellungen abgeleitet. In den verbleibenden zwei Jahren wird das SPP1257 seine Arbeiten auf ein noch besseres Verständnis der Satellitendaten und auf die Verbesserung des Prozessverständnisses auf unterschiedlichen Zeitskalen fokussieren (vgl. Abbildung 5.3). Deshalb geben die folgenden drei zentralen Themen den inhaltlichen Rahmen für alle Projekte der letzten Förderphase vor:

Theme 1: Understanding the satellite signals

Der in den Satellitendaten vorhandene Signalinhalt soll unter den Gesichtspunkten Unsicherheit, Auflösung, Konsistenz und Signaltrennung noch besser als bisher ausgeschöpft werden. Dazu gehören verbesserte Analysemethoden, die Verbesserung der verwendeten Hintergrundmodelle und die Optimierung von Methoden, um die integrierten Massensignale den einzelnen geophysikalischen Phänomenen zuzuordnen. Damit nimmt dieses Thema eine Querschnittsrolle innerhalb des SPP1257 ein, da nahezu alle Projekte von einer verbesserten Prozessierung der Satellitensignale profitieren.

Theme 2: Steady-State and long-term processes

Statische Massenverteilungen und stationäre Prozesse der festen Erde (wie Kruste und Mantelkonvektion) bilden sich im Schwerefeld ab, während sich stationäre Ozeanströmungen in der mittleren Meerestopographie widerspiegeln. Reprozessierte Altimeterdaten und die Gradiometerbeobachtungen des GOCE-Satelliten tragen durch gesteigerte Auflösungen und Genauigkeiten zum besseren Verständnis dieser Prozesse bei. Die Analyse von GRACE-Zeitreihen ermöglicht die Bestimmung langzeitiger Massenvariationen wie z.B. die postglaziale Landhebung, Eismassenverluste oder der Anstieg des Meeresspiegels.

Theme 3: Short-term processes

In diesem dritten integrativen Thema werden disziplinübergreifend diejenigen Massentransportphänomene untersucht, welche sich auf Zeitskalen von wöchentlich bis dekadisch abspielen. In diesem Zeitbereich do-

minieren die Umverteilungen der Wassermassen in oberflächennahen Subsystemen wie den Ozeanen, der Kryosphäre oder der kontinentalen Hydrologie und Wechselwirkungen zwischen diesen Subsystemen. Das Ziel besteht darin, alle relevanten Beiträge zu Wassermassentransporten im globalen hydrologischen Kreislauf zu harmonisieren und konsistent zu integrieren.

Die Mitglieder der FGS sind an mehreren laufenden Projekten des SPP1257 direkt beteiligt und beabsichtigen, neue, z.T. modifizierte Themen in der letzten Förderphase aufzugreifen (vgl. Tabelle 5.1). Dabei werden die Mitglieder der FGS vor allem ihre Expertise auf den Gebieten der Schwerfeldbestimmung und der Satellitenaltimetrie einbringen (vgl. die Abschnitte 4.3 und 4.4). Von besonderem Wert für den SPP1257 werden die von dem IAPG koordinierten Arbeiten der High Performance Facility (HPF) für die GOCE Mission sein. Daten und Produkte von GOCE werden innerhalb des Schwerpunktes entscheidende Grundlagen liefern für die Themen 1 (Understanding the signal) und 2 (Steady-state and long-term processes). Darüber hinaus werden die kinematischen und geometrischen Signale der Satellitenaltimetrie in mehrere Projekte eingebracht. Damit trägt die FGS wesentlich zu den geodätischen Grundlagen aber auch zur notwendigen Vernetzung der im SPP1257 identifizierten Forschungsthemen bei (vgl. Abbildung 5.4).

Tabelle 5.1: Laufende und geplante Forschungsprojekte des SPP1257, an denen die Mitglieder der FGS beteiligt sind.

Projekt (Status)	Thema	Beteiligte
DAROTA (laufend)	Modeling ocean tides by hydrodynamics and combined analysis of altimetry and GRACE data	Uni Hamburg, DGFI München , Uni Bonn, GFZ Potsdam
GEOTOP (laufend)	Sea Surface Topography and Mass Transport of the Antarctic Circumpolar Current	IAPG München , AWI Bremerhaven, DGFI München
IDEAL-GRACE (laufend)	Improved de-Aliasing for Gravity Field Modeling with GRACE	IAPG München , GFZ Potsdam, DLR, Uni Hamburg
TASMAGOG (laufend)	Temporal and spatial multi-scale assessment of mass transport by combination of gravity observations from GRACE and terrestrial stations	GFZ Potsdam, BKG Frankfurt , Uni Jena
PROMAN (laufend)	Program Management and Scientific Networking	Uni Bonn, DGFI München
COWAS (geplant)	Mass variations in continental water storage compartments from a combination of heterogeneous space observations.	IAPG München , GFZ Potsdam, DGFI München
IMOSAGA (geplant)	Integrated modeling of satellite and airborne gravity data of active plate margins	Uni Kiel, Uni Jena, IAPG München
IMPLY (geplant)	Improved modeling of non-tidal mass variations for optimized gravity field analysis	IAPG München , Uni Luxembourg, GRGS Toulouse, GFZ Potsdam
MaSiS (geplant)	Separation of mass signals by common inversion of gravimetric and geometric observations	DGFI München , GFZ Potsdam
TASMAGROUND (geplant)	Temporal and spatial multi-scale assessment of mass transport: GROUND and GRACE observations	Uni Jena, BKG Frankfurt , GFZ Potsdam

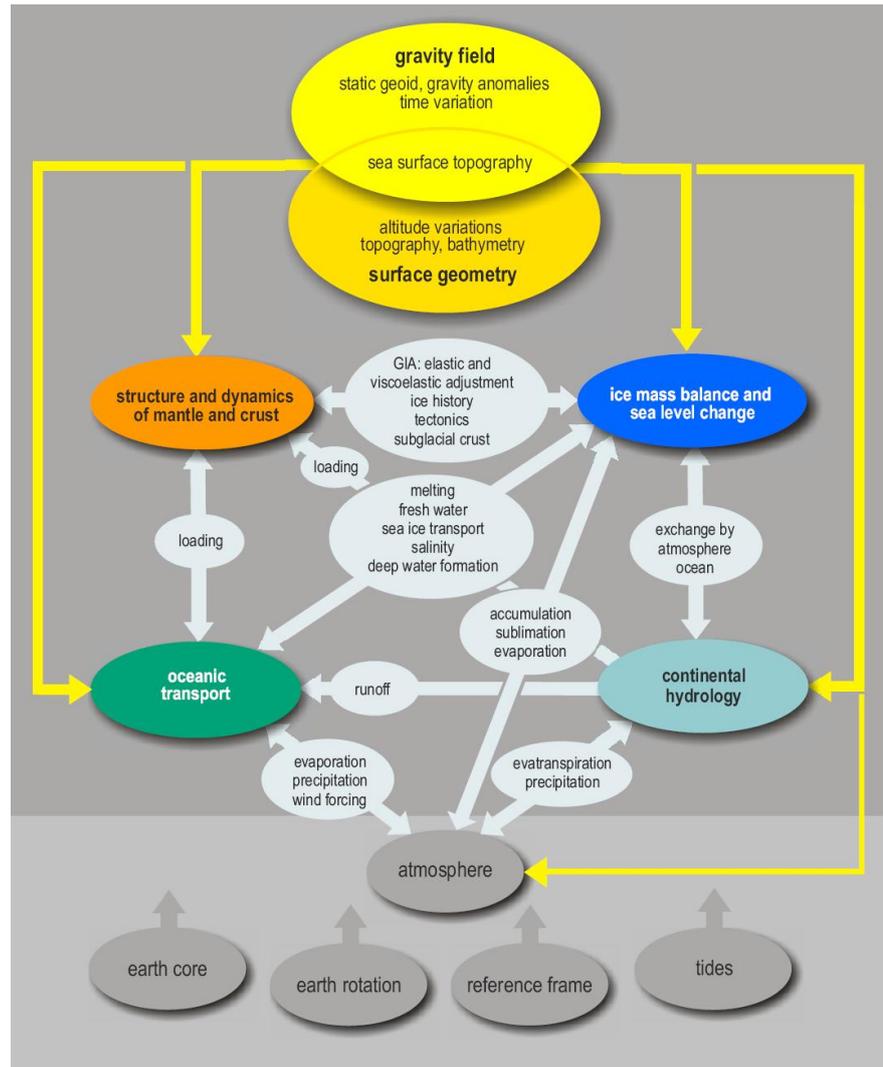


Abbildung 5.4: Vernetzung der Forschungsthemen des DFG Schwerpunktprogramms SPP1257 mit Massenaustauschbeziehungen zwischen verschiedenen Komponenten des Systems Erde. Die im unteren Teil dargestellten Wirkungselemente sind Schnittstellen zu anderen Forschungsschwerpunkten (modifiziert aus Ilk et al. 2005)

Kontinentale Hydrologie

Aktuelle Arbeiten im Rahmen des laufenden Projekts CLIVAR-Hydro zielen auf die Separation der integralen durch GRACE beobachteten hydrologischen Massenvariationen in die Beiträge einzelner Speicherkomponenten wie Oberflächenwasser (z.B. in Seen, Flüssen und Überschwemmungsgebieten), Schnee/Eis, Bodenfeuchte oder Grundwasser. In einem Multi-Missionsansatz werden Satellitenfernerkundungsdaten gemeinsam mit in-situ Beobachtungen ausgewertet. Die unterschiedliche Sensitivität der verfügbaren Sensoren bezüglich individueller Speicherkomponenten sowie die unterschiedliche Dynamik der Variationen in den einzelnen hydrologischen Komponenten erlaubt die Aufspaltung des durch GRACE gemessenen Gesamteffekts. Eine verbesserte Kenntnis der Anteile einzelner Speicherkomponenten an der Gesamtspeicherung und die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Komponenten sind wichtige Beiträge zur Erforschung regionaler hydrologischer Abläufe und ihrer Veränderungen sowie des globalen hydrologischen Kreislaufs insgesamt. Nicht zuletzt trägt eine verbesserte quantitative Beschreibung der kontinentalen Hydrologie auch erheblich zum Verständnis weiterer geodätischer Parameter bei. Genannt sei hier zum Beispiel die durch

zeitvariable Eis- und Schneebedeckung hervorgerufene Veränderung des mittleren Meeresspiegels (Marcus et al., 2009) sowie die bislang mit großer Unsicherheit behafteten Beiträge der kontinentalen Hydrologie zur Variation der Erdrotation (Fernandez et al, 2007).

5.4 Erdrotation

5.4.1 DFG Forschergruppe Erdrotation und globale dynamische Prozesse

Die Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse" (FOR584) wurde von der DFG 2006 eingerichtet. 2009 wurde eine weitere Förderphase bewilligt. Insgesamt werden zehn Projekte bearbeitet. Das Hauptziel der Forschergruppe ist eine umfassende und konsistente Modellierung der Rotation der Erde. Aus diesem Grund werden physikalische Phänomene, die einen Einfluss auf die Schwankungen der Erdrotation haben, sehr genau untersucht. Eine maximale Konsistenz kann nur gewährleistet werden, wenn die Interaktionen und Kopplungen zwischen den verschiedenen Subsystemen berücksichtigt werden.

Die wissenschaftlichen Herausforderungen liegen

- in der relativistischen Modellierung der Rotation und einer besseren Modellierung der Nutation,
- in der konsistenten Modellierung der relevanten geophysikalischen Komponenten für die Erdrotation und deren Wechselwirkung,
- in der Verbesserung des Verständnisses transienter Signale in Laserkreisel Daten sowie der Kombination von Laserkreisel Daten mit den anderen Techniken,
- in einer verbesserten Analyse der Lasermessungen zum Mond,
- in der konsistenten kombinierten Prozessierung und Analyse der Daten der geodätischen Raumverfahren und
- in einer nachhaltigen Datenhaltung und Entwicklung interaktiver Werkzeuge zur EOP-Analyse.

Die Erdrotationsforschung leistet nicht nur wesentliche Beiträge für die Geodäsie, sondern ist auch für eine Reihe von Nachbardisziplinen aus dem Bereich der Geowissenschaften von besonderer Bedeutung. Variationen der Erdrotation sind globale und integrale Indikatoren für dynamische Prozesse, welche Massenumlagerungen in der festen Erde, der Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und entsprechende Deformationen des Erdkörpers zur Folge haben. Abbildung 5.5 illustriert die Komponenten des Systems Erde und deren komplexe und i.a. nichtlineare Kopplungen.

Mitglieder der FGS sind an mehreren Projekten beteiligt (s. Tabelle 5.2). Weiterentwickelt wird am Earth Rotation Information System (ERIS), dem Portal für ein 'virtuelles Erdrotations-System' (siehe auch Abschnitt 3.2.3). Im Rahmen des Projektes 5 wird gegenwärtig das Wettzell Laser Ranging System (WLRS) revidiert und für die Laserdistanzmessung zum Mond vorbereitet (s. auch Abschnitt 2.4.2). Das Ziel der Projekte 6 und 9 ist eine konsistente Kombination von Erdrotationszeitserien mit Deformationen des Erdkörpers und niedrigen Termen des Erdschwerefeldes. Im Rahmen des Projektes 7 werden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin atmosphärische Einflüsse auf den Großringlaser "G" untersucht, Projekt 8 widmet sich der Kombination der modernen Raumverfahren, inklusive des Großringlasers, zur Beobachtung subtäglicher Erdrotationsparameter.

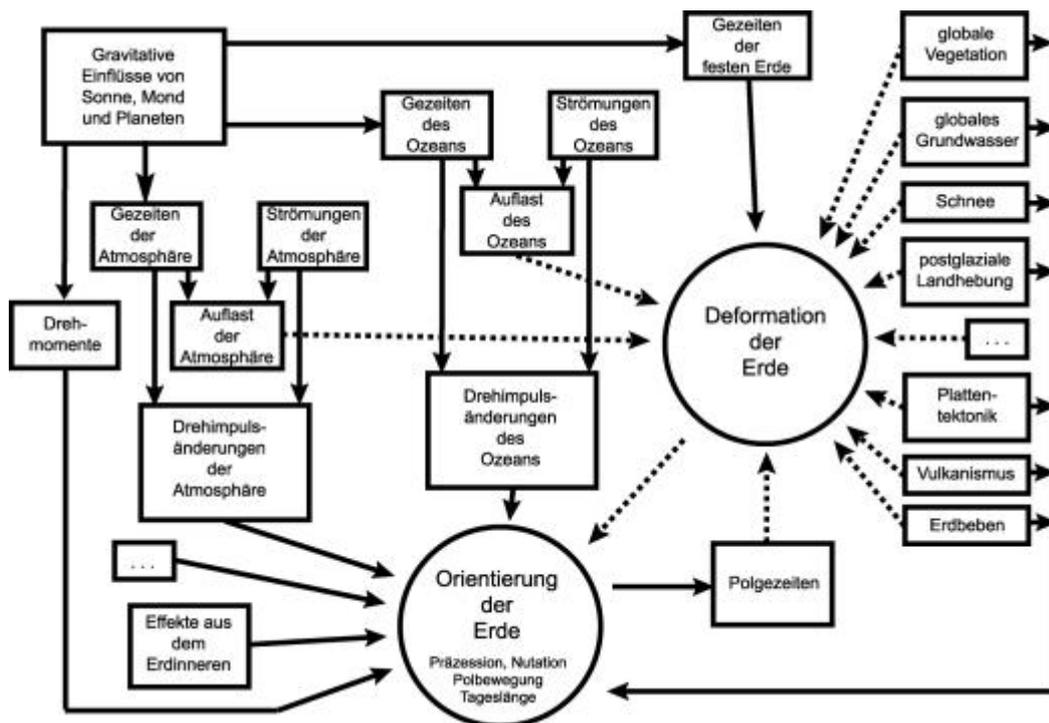


Abbildung 5.5: Komponenten und Einflüsse im System Erde, welche für die Erdrotation relevant sind (Schuh et al., 2003). Direkte Einflüsse dynamischer Prozesse auf die Erdrotation sind durchgezogen dargestellt, indirekte Einflüsse, welche sich über die Deformation der Erde auswirken, gestrichelt.

Tabelle 5.2: Forschungsprojekte des FOR 584, an denen die Mitglieder der FGS beteiligt sind

Projekt (Status)	Thema	Beteiligte
Projekt 1 (laufend)	Earth Rotation Information System: Development of a virtual Earth rotation system for geodetic and geoscience application (ERIS)	BKG Frankfurt, TU Dresden
Projekt 5 (laufend)	Lunar Laser Ranging: Consistent modeling for geodetic and further scientific applications	Uni Hannover, FESG München
Projekt 6 (laufend)	Integration of Earth rotation, gravity field and geometry using space geodetic observations	DGFI München, FESG München, GFZ Potsdam
Projekt 7 (laufend)	Modelling of episodic-transient signals in measurement of large ring lasers	FESG München, BKG Frankfurt, Uni Berlin
Projekt 8 (laufend)	Investigation of sub-daily and episodic variations of Earth rotation	TU Wien, IGG Bonn, FESG München, GFZ Potsdam
Projekt 9 (laufend)	Combined analysis and validation of Earth rotation models and observations	Uni Hannover, DGFI München, IAPG München

5.4.2 Dynamisches Erdsystemmodell

Im Rahmen mehrerer von der DFG geförderten abgeschlossenen Bündelprojekte ("Erdrotationsvektor" und "Erdsystemmodell") wurde das nichtlineare dynamische Erdsystemmodell DyMEG (Dynamic model for Earth rotation, gravity and surface geometry) entwickelt (Seitz, 2004). DyMEG ist ein Vorwärtsmodell, mit dem zeitliche Variationen der Erdrotation, niederer Koeffizienten des Erdschwerefelds sowie der Oberflächen-deformationen des Erdkörpers durch gravitative und andere geophysikalische Anregungen simultan und konsistent simuliert werden können. Das

Modell DyMEG basiert auf der Drehimpulsbilanzgleichung im Erdsystem (Liouville-Gleichung). Angetrieben wird das Modell durch externe atmosphärische, ozeanische und hydrologische Modell- oder Beobachtungsdaten (Massenverlagerungen und Massenbewegungen) und berücksichtigt von außen auf das Erdsystem einwirkende gravitative Drehmomente sowie das Gezeitenpotential von Sonne und Mond (Abbildung 5.6).

In DyMEG werden Zeitreihen der Erdrotationsparameter (Polbewegung und Tageslängenvariation) durch die numerische Integration der Liouville-Gleichung berechnet (Seitz and Kutterer, 2002). Deformationen des Erdkörpers aufgrund von Auflasten werden über atmosphärische, ozeanische und hydrologische Druckvariationen berechnet. Neben dem üblichen auf ortsunabhängigen Love'schen Auflastzahlen und Green'schen Funktionen beruhenden Ansatz (Farrell, 1972) ist in DyMEG eine alternative Methode implementiert, bei der die Green'schen Funktionen durch ortsabhängige Gewichtungsfunktionen ersetzt wurden. Die Parameter der Gewichtungsfunktionen wurden in Abhängigkeit der Krustendichte aus wöchentlichen Zeitreihen vertikaler Bewegungen global verteilter GPS-Beobachtungsstationen zwischen 1996 und 2005 geschätzt (Seitz and Krügel, 2009). Dabei konnte vor allem in Regionen, in denen starke jährliche Auflastvariationen ausgeprägte Jahressignale in den GPS-Zeitreihen verursachen, deutliche Verbesserungen gegenüber dem üblichen Ansatz nach Farrell (1972) erzielt werden. Für die nächste Periode ist vorgesehen, die ortsabhängige Berechnung der Auflastdeformationen über die Finite-Elemente-Methode durchzuführen. Die Grundlage einer derartigen Modellierung bildet das Krustenmodell CRUST2.0 (Bassin et al., 2000).

Massenvariationen des Erdkörpers aufgrund der Auflastdeformation werden in DyMEG in Variationen des Trägheitstensors der Erde umgerechnet und neben den direkt durch atmosphärische, ozeanische und hydrologische Massenverlagerungen verursachten Trägheitstensorvariationen in der Liouville-Gleichung modelliert. Die Variationen des Trägheitstensors stehen mit den Koeffizienten zweiten Grades der Kugelfunktions-

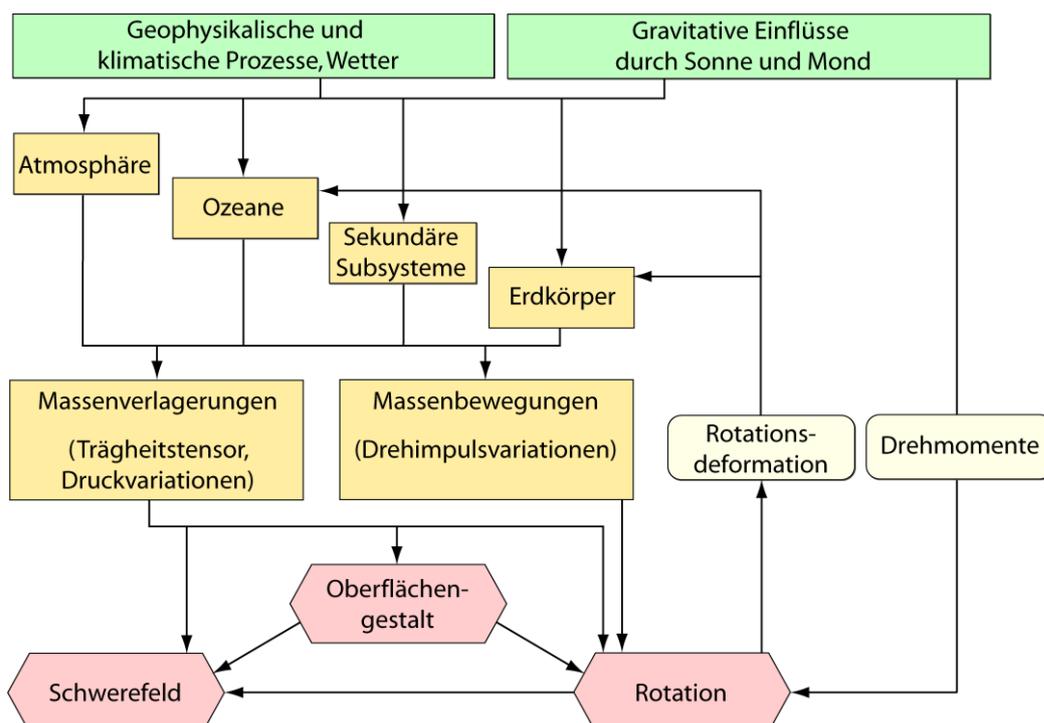


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung des dynamischen Erdsystemmodells DyMEG

entwicklung des Erdschwerefelds in Zusammenhang. Zeitliche Änderungen der Koeffizienten höherer Grade werden aus der in DyMEG beschriebenen zeitvariablen Massenverteilung im Erdsystem über den Ansatz nach Chao (1994) modelliert.

In zahlreichen Studien wurde gezeigt, dass die Simulationsergebnisse aus DyMEG sehr gut mit geodätischen Beobachtungen übereinstimmen, die zum Teil über Zeiträume von mehreren Jahrzehnten mit einer Korrelation von mehr als 0.95 reproduziert werden können (z.B. Seitz, 2004; Seitz, 2005a). Da das Modell die Liouville-Gleichung ausgehend von gegebenen Anfangswerten numerisch integriert, kann das Modell auch für Vorhersagen über beliebige Zeiträume genutzt werden und ermöglicht auf diese Weise Studien zur Entwicklung der geodätischen Parameter unter Szenarien des globalen Wandels (Seitz und Drewes, 2009; Winkelkemper et al., 2008).

Da der Effekt der Rotationsdeformation im Modell berücksichtigt wird, die einen signifikanten Effekt auf Periode und Amplitude der sogenannten Chandler-Schwingung hat, stellt DyMEG ein ideales Modell für die Erforschung des Zusammenhangs zwischen freien und erzwungenen Anteilen der Erdrotation dar. Auf diese Weise konnte das atmosphärische Hintergrundrauschen auf der Wetterzeitskala als dominanter Anregungsmechanismus der Chandler-Schwingung ermittelt werden (Seitz, 2005b; Seitz et al., 2005; Seitz and Schmidt, 2005).

Allerdings zeigte sich im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (Seitz and Kutterer, 2005), dass die numerischen Modellergebnisse sehr stark von einigen Modellparametern abhängen, die zum Teil auf geophysikalischen Modellannahmen beruhen und daher nur ungenau bekannt sind (z.B. Love-Zahlen oder die Orientierung der Hauptträgheitsachsen des Erdmantels). In einem laufenden von der DFG im Rahmen der Forschergruppe Erdrotation geförderten Projekt (Combined analysis and validation of Earth rotation models and observations) soll DyMEG zur Schätzung von ungenau bekannten physikalischen Erdparametern aus geodätischen Beobachtungen der Erdrotationsparameter und Schwerefeldkoeffizienten niederen Grades herangezogen werden (Inversion). Die notwendigen Arbeitsschritte umfassen die Analyse unterschiedlicher Inversionsalgorithmen im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit, die Implementierung in DyMEG sowie die Schätzung und Validierung geeigneter Erdparameter. Da die Genauigkeit der geodätischen Beobachtungen sehr hoch ist, kann eine signifikante Verbesserung der Modellparameter erwartet werden.

6 Beteiligung der FGS an den internationalen Diensten

Internationaler Dienst	FGS Institution
International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)	
Zentralbüro und Datenbank	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
ITRS Combination Centre	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Vertretung im Directing Board	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG), Technische Universität München
Working Group on Combination at the Observation Level	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG), Technische Universität München Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Working Group on Site Survey and Co-locations	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG), Technische Universität München Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn
International GNSS Service (IGS)	
CODE Analysezentrum	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München
Regionales Datenzentrum Europa	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Regionales Analysezentrum	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Tide Gauge Benchmark (TIGA) Analysezentrum	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Beobachtungsstationen	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Antenna Working Group	Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG), Technische Universität München
Vertretung im Governing Board	Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München
Internationaler Dienst	FGS Institution
International Laser Ranging Service (ILRS)	
Analysezentrum	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Kombinationszentrum	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut

Datenzentrum	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Beobachtungsstationen	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Vertretung im Governing Board	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Data Formats and Procedures Working Group	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Transponder Working Group	Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie
Analysis Working Group	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)	
Analyse-Koordinator	Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn
Analysezentrum	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn
Kombinationszentrum	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Datenzentrum	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Korrelationszentrum	Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Operationszentrum	Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Beobachtungsstationen	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München
Vertretung im Directing Board	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn
International Altimetry Service (IAS)	
Vorsitz beim Aufbau	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
International Gravity Field Service (IGFS)	
International Gravity Bureau	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Working group on Absolute Gravimetry	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Global Geodynamics Project	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Vertretung im Advisory Board	Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn

7 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 Institute sind:

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

Abbildung 7.1 gibt eine Übersicht über die beteiligten Institutionen und deren administrative Einbindungen.

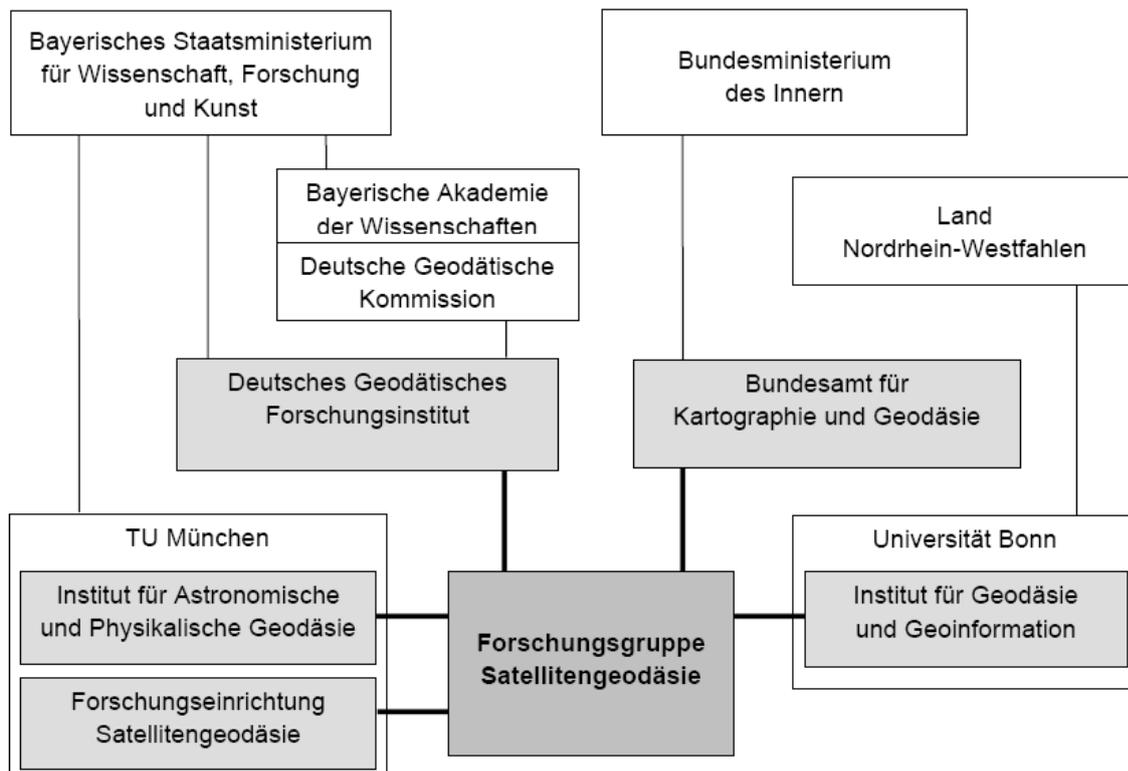


Abbildung 7.1: Übersicht über die an der FGS beteiligten Institutionen und ihre administrative Einbindung.

Die Übersicht in Tabelle 7.1 fasst die Zuordnung der Verantwortungsbereiche der Vorhaben des formulierten Forschungsprogramms zusammen.

Im Januar 2005 wurde auf Initiative des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst (BayStMinWFK) das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut (DGFI) durch den Wissenschaftsrat evaluiert. Zur Umsetzung der Empfehlung des Wissenschaftsrats nach einer Neustrukturierung der in München beheimateten geodätischen Institutionen schließen sich das DGFI, das IAPG, die FESG sowie die Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung (BEK) der Bayerischen

Tabelle 7.1: Zuordnung der Verantwortungsbereiche

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

Akademie der Wissenschaften zu einem "Centrum für Geodätische Erdsystemforschung" (CGE) zusammen.

Die vier Institutionen bleiben organisatorisch bestehen, aber es werden aber fünf Arbeitsbereiche gebildet, denen i.A. Mitarbeiter mehrerer der Institutionen angehören. Das CGE wird durch eine Geschäftsstelle geleitet. Die Forschungsarbeiten werden durch einen Vorstand koordiniert und das gemeinsame Forschungsprogramm wird regelmäßig durch einem international besetzten wissenschaftlichen Beirat begutachtet. Der Nachfolger von Hermann Drewes als Direktor des DGFI wird in einer gemeinsamen Berufung durch DGK und TUM bestellt. Durch die noch engere Zusammenarbeit der vier Münchner Institutionen werden weitere Synergien auch für die FGS realisiert werden. Da die am CGE beteiligten Institutionen ihre administrative und organisatorische Unabhängigkeit, bleibt die Struktur der FGS unangetastet.

8 Haushaltmäßige Sicherung 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.

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 seinem Ausbau und Betrieb 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 und das Bezugssystem für Lateinamerika 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 Kapitel 6 dargestellt. Die gegenwärtig von den Beteiligten aus der Grundausstattung bestrittenen Aufgaben sind in der folgenden Tabelle 8.1 zusammengestellt.

Tabelle 8.1: Beiträge der FGS Partner aus der Grundausstattung

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
	GRAF Operations-, Daten- und Analysezentrum
	IERS Zentralbüro
	GGOS Portal
	Earth Rotation Information System (ERIS)

DGFI	Generalsekretariat der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG)
	ITRS Kombinationszentrum
	Betrieb von GPS-Stationen für IGS und SIRGAS
	IGS Regionales Assoziiertes Analysezentrum für SIRGAS (GPS)
	IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Project (TIGA) Analysezentrum
	ILRS Datenzentrum, EUROLAS Datenzentrum (SLR)
	ILRS Analysezentrum (SLR)
	ILRS Kombinationszentrum (SLR)
	ILRS Operationszentrum (SLR)
	IVS Analysezentrum (VLBI)
	Beteiligung am IVS Kombinationszentrum (VLBI)
	Aufbau des Internationalen Altimeter Service (IAS)
	Beteiligung am GGOS Bureau for Standards and Conventions
FESG	Betrieb des Radioteleskops am Geodätischen Observatorium Wettzell
	Beteiligung an der Entwicklung des neuen SLR-Systems SOS-W
	Beteiligung am Betrieb des Ringlasers G
	Beteiligung an der Fortentwicklung des SLR-Systems WLRS
	Beteiligung an der Entwicklung grosser Ringlaser in Christchurch (NZ)
	Betrieb des Geosensors in Pinon Flat
	Leitung des GGOS Bureau for Standards and Conventions
IAPG	Arbeiten zur ESA Satellitenmission GOCE
	GRACE Sensoranalyse
	GIOVE-A und B Bahnbestimmung
	Beteiligung am CODE Rechenzentrum des IGS
	Beteiligung am GGOS Bureau for Standards and Conventions
	Leitung der IGS Antennen-Arbeitsgruppe
	Sekretariat der IAU Commission 19 „Rotation of the Earth“

IGG	Durchführung von VLBI-Korrelationen
	IVS-Analysekoordinator (VLBI)
	IVS-Analysezentrum (VLBI)
	IVS-Operationszentrum (VLBI)
	IVS-Kombinationszentrum (VLBI)

Die Forschungsgruppe bemüht sich über Anträge bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), bei der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA), der DLR Raumfahrt-Agentur und im 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union um die Einwerbung von Drittmitteln.

Die Tabellen 8.2 und 8.3 geben eine detaillierte Auskunft über die in den Jahren 2005 bis 2010 abgeschlossenen sowie die laufenden und beantragten Drittmittelprojekte, die die Ziele des Forschungs- und Entwicklungsprogramms der FGS berühren.

Tabelle 8.2: Liste der laufenden, bewilligten und beantragten Drittmittelprojekte

Antragsteller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
BKG	Galileo Joint Undertaking	GJU/05/2420 CTR/GGSP	Implementation of Galileo Geodetic Service Provider Prototype (GGSP)	laufend
DGFI	ESA	GOCE-HPF	GOCE scientific pre-processing and external calibration	laufend
DGFI	BWB	M/UR1D/8A229/ 8A576	Softwareanwendung für die Erzeugung hochgenauer regionaler Geoidmodelle als Höhenbezugsfläche für Einsatzgebiete	laufend
FESG	Marsden	Royal Society NZ, 07-UOC-066	A High Stability, Precision Rotation Sensor for the 21st Century	laufend
FESG	DLR/BMWi	50NA0904	Einsatz optischer Uhren in der Satellitennavigation (OCTAGON)	laufend
FESG	DFG	SCHR 645/3-1 SCHR 645/3-2	Earthquake induced rotational ground motion	laufend
FESG	EU/FP7	NEXPreS 261525 FP7-INFRASTRUCTURES-2010-2	Novel EXplorations Pushing Robust e-VLBI Services	beantragt
FESG	Marsden	Royal Society NZ	Length of Day and Relativistic Precision Measurement	beantragt
FESG	NSF	Proposal No 1028928 (SIO, LMU, FESG)	Development of the First Three Component Broadband Observatory Rotation Sensor: Towards a Complete Recording of Ground Motion	beantragt
IAPG	DFG	HU 1558/1-1	Geodätische und geodynamische Nutzung reprozessierter GPS-, GLONASS und SLR-Daten	laufend
IAPG	ESA	AO/1-6231/09/D/SR	Satellite and Station Clock Modelling for GNSS	beantragt

Fortsetzung Tabelle 8.2

Antragsteller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
IAPG	DFG	Rotationssensor Mitantragsteller RU 286/56-1 RU 286/56-2	Entwicklung eines hochgenauen Rotationsensors mit dem suprafluiden He als Arbeitsmedium	
IAPG	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
IAPG	ESA	GOCE-PDS	GOCE-Payload Data System	laufend
IAPG	ESA	NGGM	Next Generation Gravity Field Mission	laufend
IAPG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	IMPALA: Verbesserte Modellierung der Akzelerometer und alt. Level 1 Prozessierung	laufend
IAPG	ESA	GOCE Data AO	Combination of GOCE Data with complementary Gravity Field Information (GOCO)	laufend
IAPG	DLR	GOCE Projektbüro	GOCE Projektbüro	laufend
IAPG	TUM	IGSSE Mass Transport	Mass Transport from Constellation Flights (SWARM)	laufend
IAPG	TUM	IGSSE CLIVAR-Hydro	Signals of Climate Variability in Continental Hydrology from Multi-Sensor Space and In-situ Observations and Hydrological Modeling	laufend
IGG	DFG	NO318/5-1	Verbesserte Bestimmung der Erdrotation durch Nutzung des Wettzell Twin-Radioteleskops mit optimierten Beobachtungsplänen	laufend
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)	laufend
DGFI			Dynamical and residual ocean tide analysis for improved GRACE de-aliasing (DAROTA), BO 1228/5-1	laufend
DGFI			Sea surface topography and mass transports of the Antarctic Circumpolar Current (GEOTOP 2)	laufend
IAPG			Improved de-aliasing for gravity field modelling with GRACE (IDEAL-GRACE 2)	laufend
IAGP				

Fortsetzung Tabelle 8.2

Antragsteller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
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)	laufend
BKG			Modelling of episodic-transient signals in measurements of large ring lasers	laufend
FESG				
DGFI			Integration of Earth rotation, gravity field and geometry using space geodetic observations ("Rotation, gravity and geometry")	laufend
FESG				
DGFI			Combined analysis and validation of Earth rotation models and observations	laufend
IAPG				
FESG			Lunar Laser Ranging: Consistent modelling for geodetic and scientific applications	laufend
IGG		Investigation of sub-daily and episodic variations of Earth rotation	abgeschlossen	
BKG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	REAL-GOCE: Realdatenanalyse GOCE	laufend
DFGI				
IAPG				
BKG	DFG	DFG Forschergruppe "Referenzsysteme"	Space-Time Reference Systems for Monitoring of Global Change and for Precise Navigation	Vor Antrag eingereicht
DGFI				
FESG				
IGG				
DGFI	DFG	SCHM 2433/2-1	Multi-Skalen-Ionosphärenmodell aus der Kombination moderner Satellitenverfahren ("MuSIK")	beantragt
IAPG		HU 1558/2-1		beantragt

Tabelle 8.3: Liste der im Zeitraum 2005-2010 abgeschlossenen Drittmittelprojekte

Antragsteller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
BKG	Galileo Joint Undertaking	GJU/04/2412/CUNV/GIGA	Galileo Integrated Georeference Application (GIGA)	abgeschlossen
FESG	DLR	D/957/67007817	Altimeter-Demonstrator	abgeschlossen
FESG	DLR	D/957/67025766	BepiColombo Laser Altimeter (BELA) Simulator	abgeschlossen
FESG	Astrium GmbH	D.2700.01.01.01.07	ACES ELT Breadboard Demonstration Experiment	abgeschlossen
FESG	DFG	RO 2330/1-1 RO 2330/1-2	IGS Reprozessierung	abgeschlossen

Fortsetzung Tabelle 8.3

FESG	EADS	Galileo	Galileo Bahnbestimmung	abgeschlossen
IAPG	ESA	GOCE-CMF	GOCE Calibration and Monitoring Facility – SSTI for Algorithms for the SSTI part	abgeschlossen
IAPG	ESA	GOCE-GUTS	GOCE User Toolbox Study	abgeschlossen
IAPG	ESA	ACES Topical Team	ACES Topical Team	abgeschlossen
IAPG	DFG	IDEAL-GRACE GR 2081/3-1	Improved De-Aliasing GRACE	abgeschlossen
IAPG	DFG	GEOTOP RU 586/5-1 STA 410/9-1	Ozeanzirkulation und Schwerefeld	abgeschlossen
IAPG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	Qualitätsverbesserte GRACE Level-1 und Level-2 Produkte und deren Validation gegen Ozeanbodendruck	abgeschlossen
IAPG	ESA	Massentransporte	ESA Mass Transport Study	abgeschlossen
IAPG	EADS	ACES	Support to ACES Precise Orbit Determination	abgeschlossen
IGG	DFG	CA 92/11-1	Kalibrierung von GPS-Antennen im HF-Labor	abgeschlossen
Verbundprojekte				
BKG	BMBF und DFG	Sonderprogramm Geotechnologien	Integration der Raubeobachtungsverfahren als Grundlage eines globalen geodätisch-geophysikalischen Beobachtungssystems (GGOS-D)	abgeschlossen
DGFI				
FESG				
IGG				
BKG	BMBF und DFG	Sonderprogramm Geotechnologien GOCE-GRAND II	Regionales Validierungs- und Kalibrierungsexperiment	abgeschlossen
IAPG			GOCE Gravitationsfeldanalyse Deutschland II	abgeschlossen

9 Zitierte Literatur

- Albertella A., R. Rummel (2009): On the Spectral Consistency of the Altimetric Ocean and Geoid Surface. A One-dimensional Example. *Journal of Geodesy*, 83(9), 805 - 815, Springer, ISSN 0949-7714, doi: 10.1007/s00190-008-0299-5.
- Andersen, O. B., P. Knudsen (2009), DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models, *J. Geophys. Res.*, 114, C11001, doi:10.1029/2008JC005179.
- Angermann, D., R. Kelm, M. Kruegel, B. Meisel, H. Mueller, V. Tesmer, D. Thaller, R. Dill (2006): Towards a rigorous combination of space geodetic observations for IERS product generation. Springer In: J. Flury, R. Rummel, C. Reigber, M. Rothacher, G. Boedecker, U. Schreiber (Eds.): *Observation of the Earth System from Space*, 373-387.
- Angermann, D., H. Drewes, M. Kruegel, B. Meisel (2007): Advances in terrestrial reference frame computations. Springer, IAG Symposia, Vol. 130, 595-602.
- Angermann, D., H. Mueller (2009): On the strength of SLR observations to realize the scale and origin of the terrestrial reference system. Springer, IAG Symposia, Vol. 133, 21-29.
- Angermann, D., H. Drewes, M. Gerstl, M. Krügel, B. Meisel (2009): DGFI combination methodology for ITRF2005 computation. In: Drewes, H. (Ed.): *Geodetic Reference Frames*, IAG Symposia, Springer, Vol. 134, 11-16.
- Bassin, C, G. Laske, G. Masters (2000) The current limits of resolution for surface wave tomography in North America. *EOS Trans AGU* 81: F897.
- Belfi, J., N. Beverini, F. Bosi, G. Carelli, A. DiVirgilio, R. Graham, E. Maccioni, M. Pizzocaro,, A. Porzio, K. U. Schreiber, S. Solimeno, F. Sorrentino, A. Velikoseltsev (2009): The G-Pisa gyrolaser. *IEEE International*, 738-741, doi: 10.1109/FREQ.2009.5168282.
- Beverini, N., M. Prevedelli, F. Sorrentino, B. Nyushkov, A. Ruffini (2004): An analog+digital phase-frequency detector for phase locking of a diode laser to an optical frequency comb, *Quant. Electr.* 34(6), 559–564
- Boedecker, G., Th. Fritzer (1986): International absolute gravity basestation network. IAG-SSG 3.87 Status Report March 1986. Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Astronomisch-geodätische Arbeiten, Heft Nr. 47, München.
- Böhm, J., B. Werl, H. Schuh (2006): Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *J. Geophys. Res.*, 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629.
- Bondurant, R. S., J. H. Shapiro (1984): Squeezed States in Phase Sensing Interferometers. *Phys. Rev. D* 30, 2548.
- Bosch, W. (2007): Contribution of altimeter time series for a Global Geodetic Observing System. *Geotechnologien Science Report*, No. 11, 64-66, Koordinierungsbüro Geotechnologien, Potsdam.
- Bosch, W. (2008): *Der Meeresspiegel – ansteigend und fast im Lot.* Akademie Aktuell, 01/2008, 30-33, ISSN: 1436-753X.
- Bosch W., R. Savcenko (2005): Satellite Altimetry: Multi-mission cross calibration. In: *Dynamic Planet 2005*, ed. Ch. Rizos and P. Tregoning, IAG Symposia, Vol. 130, Berlin, Springer

- Bosch, W., R. Savcenko (2009): On estimating the dynamic ocean topography – a profile approach. In: Mertikas, S. (Ed.) IAG Proceedings, Geoid and Earth Observation, GGEO 2008, 23-27 June, 2008, Chania, Crete, Greece, Springer, Berlin.
- Bosch, W., R. Savcenko, F. Flechtner, C. Dahle, T. Mayer-Guerr, D. Stammer, E. Taguchi, K.-H. Ilk (2009): Residual ocean tide signals from satellite altimetry, GRACE gravity fields, and hydrodynamic modelling. *Geophys. J. Int.* (178) 1185-1192, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04281.x.
- Bouman, J., W. Bosch, G. Goebel, H. Müller, L. Sanchez, M. Schmidt, J. Sebera (2010): Das Schwerefeld der Erde – Messen, Darstellen und Auswerten. *ZfV* 135, 2, 87-92.
- Brown S.T., S. Desai, W. Lu, A.B. Tanner (2007): On the Long-Term Stability of Microwave Radiometers Using Noise Diodes for Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45(7)
- Chelton, D. B., M. G. Schlax, R. M. Samelson, R. A. de Szoeke (2007): Global observations of large oceanic eddies, *Geophys.Res.Lett.*, 34, L15606, ISI:000248871800008
- Chou, C.-W., D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, T. Rosenband (2010): Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al⁺ Optical Clocks, *Quantum Physics*, submitted (version 2), arXiv:0911.4527v2 [quant-ph].
- Chao, B.F. (1994): The Geoid and Earth Rotation. In: Vanicek, P., N. Christou (Eds): *Geoid and Its Geophysical Interpretations*, 285-298, CRC Press, Boca Raton, 1994.
- Chao, B. F., D. N. Dong, H. S. Liu, T. A. Herring (1991): Libration in the Earth's Rotation, *Geophysical Research Letters*, 18(11), 2007-2010.
- Crossley, D., J. Hinderer (2009): A review of the GGP network and scientific challenges, *Journal of Geodynamics*, 48(3-5), 299-304.
- Dettmering D., W. Bosch (2010): Global Calibration of Jason-2 by Multi-Mission Crossover Analysis. *Marine Geodesy*, Vol. 33 (im Druck).
- Domingues, C. M., J. A. Church, N. J. White, P. J. Gleckler, S. E. Wijffels, P. M. Barker, and J. R. Dunn (2008), Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise, *Nature*, 453, 1090–1093, doi:10.1038/nature07080.
- Drewes, H., O. Heidbach (2005): Deformation of the South American crust estimated from finite element and collocation methods. *Springer, IAG Symposia*, Vol. 128, 544-549.
- Drewes, H., D. Angermann, M. Gerstl, M. Kruegel, B. Meisel, W. Seemueller (2006): Analysis and refined computations of the International Terrestrial Reference Frame. *Springer In: J. Flury, R. Rummel, C. Reigber, M. Rothacher, G. Boedeker, U. Schreiber (Eds.): Observation of the Earth System from Space*, 343-356.
- Drewes, H. (2007): Science rationale of the Global Geodetic Observing System (GGOS). *Springer, IAG Symposia*, Vol. 130, 703-710.
- Drewes, H. (2009): Reference systems, reference frames, and the geodetic datum – basic considerations. *Springer, IAG Symposia*, Vol. 133, 3-9.
- Drewes, H. (2009): The actual plate kinematic and crustal deformation model (APKIM2005) as basis for a non-rotating ITRF. In: Drewes, H. (Ed.): *Geodetic Reference Frames*, IAG Symposia, Springer, Vol. 134, 95-99, 2009.
- ESA (2006) *Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry*, 13-18 March 2006, Venice, Italy, ESA SP-614.

- ESA (2007): CryoSat Mission and Data description. Report CS-RP-ESA-SY-0059, ESA ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- Farrell, W. (1972): Deformation of the Earth by surface loads. *Rev Geophys Space Phys* 10: 761-797.
- Fernández, L. I., H. Schuh, M. Schmidt, F. Seitz, (2007): Effects of inter-annual water storage variations on polar motion; *Geophysical Journal International*, 169(1), 12-18, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03304.x.
- Fu, L. L., D. Alsdorf, E. Rodriguez, R. Morrow, N. Mognard, J. Lambin, P. Vaze, T. Lafon (2009): The SWOT (Surface Water and Ocean Topography) Mission, Ocean09 Community White Paper.
- Gea-Banacloche, J. (1987): Squeezing of Spontaneous Emission in a Laser. *Phys. Rev. Lett.* 59, 543.
- Gill, P., (2005) Optical Frequency Standards, *Metrologia*, 42, pp S125 - S137.
- Häner R. et al. (2004), Kochbuch zum Aufbau einer Geodateninfrastruktur, *Angewandte Informationsverarbeitung 2004*, Strobl et al. (Hrsg.), S. 196-201.
- Helm A., O. Montenbruck, J. Ashjaee, S. Yudanov, G. Beyerle, R. Stosius, M. Rothacher (2007): GORS - A GNSS Occultation, Reflectometry and Scatterometry Space Receiver, in: *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation ION GNSS 2007*, Fort Worth, Texas, Sept. 25–28, 2007, 2011-2021
- Henry, C. H., R. F. Kazarinov (1996): Quantum Noise in Photonics. *Rev. Mod. Phys.* 68, 801.
- Holzapfel, B. (2008): Transpondersimulationen für Anwendungen in den Geodätischen Raumverfahren. Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr, München, und Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie.
- Hugentobler, U., M. Plattner, S. Bedrich, M. Heinze, V. Klein, D. Voithenleitner (2009): Optical clocks in future global navigation satellites. *Proceedings of the 2nd International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme*.
- Ihde, J., L. Sánchez (2005): A unified global height reference system as a basis for IGGOS. *J. Geodyn.* 40, 400-413, doi: 10.1016/j.jog.2005.06.015.
- Ilk, K.-H., J. FLury, R. Rummel, P. Schwinzer, W. Bosch, C. Haas, J. Schröter, D. Stammer, W. Zahel, H. Miller, R. Dietrich, P. Huybrechts, H. Schmeling, D. Wolf, H. J. Götze, J. Riegger, A. Bardossy, A. Güntner, Th. Gruber (2005): Mass Transport and Mass Distribution in the Earth System – Contribution of the new generation of satellite gravity and altimetry missions to geosciences. *GOCE Projektbüro, TU München und GFZ Potsdam*.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Jäggi, A. (2007): *Pseudo-Stochastic Orbit Modeling of Low Earth Satellites Using the Global Positioning System*, *Geod. geoph. Arbeiten in der Schweiz*, Vol. 73, ISBN 978-3-908440-17-8.
- King, M., C. Watson (2010): Long GPS coordinate time series: Multipath and geometry effects. *Journal of Geophysical Research* Vol. 15, B04403
- Koop R., R. Rummel (Eds.) (2008): *The Future of Satellite Gravimetry, Workshop in Noordwijk 2007*, Institute of Advanced Study, München

- Kruegel, M., D. Angermann (2007): Frontiers in the combination of space geodetic techniques. Springer, IAG Symposia, Vol. 130, 158-165.
- Kruegel, M., D. Angermann, H. Drewes, M. Gerstl, B. Meisel, V. Tesmer, D. Thaller (2007): GGOS-D reference frame computations. Geotechnologien Science Report No. 11, 70-74.
- Kruegel, M., D. Thaller, V. Tesmer, M. Rothacher, D. Angermann, R. Schmid (2007): Tropospheric parameters: combination studies based on homogeneous VLBI and GPS data. *J. Geodesy* (81) 515-527, doi:10.1007/s00190-006-0127-8.
- Kuhn, M., W. Bosch, R. Kaniuth (2005): Low frequency variation of the North Atlantic sea level measured by TOPEX/Poseidon altimetry. *Marine Geodesy*, 28(1), 19-37, doi: 10.1080/01490410590884449.
- Lantz, B., R. Schofield, B. O'Reilly, D. E. Clark, D. DeBra (2009): Requirements for a Ground Rotation Sensor to Improve Advanced LIGO. BSSA, 99, No. 2B, 980-989.
- Lautenschlager, M., I. Sens (2003): Konzept zur Zitierfähigkeit Wissenschaftlicher Primärdaten. In: *Information: Wissenschaft und Praxis* 54, Heft 8, S. 463-466.
- Leuchs, G. (1988): Squeezing the Quantum Fluctuations of Light. *Contemporary Physics*, 29, 299.
- Leuliette E. W., L. Miller (2009): Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo, and GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L04608, doi:10.1029/2008GL036010.
- Lipphardt, B., G. Grosche, U. Sterr, Chr. Tamm, S. Weyers, H. Schnatz (2008): The stability of an optical clock laser transferred to the interrogation oscillator for a Cs fountain, *Atomic Physics*, arXiv: 0809.2150v1 [physics.atom-ph]
- Ma, C., F. Arias, G. Bainco, D. Bodoltz, S. Bolotin, P. Charlot, G. Engelhardt, A. Fey, R. Gaume, A. Gontier, R. Heinkelmann, C. Jacobs, S. Kurdubov, S. Lambert, Z. Malkin, A. Nothnagel, L. Petrov, E. Skurikhina, J. Sokolova, O. Sovers, V. Tesmer, O. Titov, G. Wang, V. Zharov (2009): The second realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry. In: A. Fey and D. Gordon (Eds.): *IERS Technical Note*, No. 35, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a. M.
- Marcos M., G. Wöppelmann, W. Bosch, R. Savcenko (2007): Decadal sea level trends in the Bay of Biscay from tide gauges, GPS and TOPEX. *Journal of Marine Systems*, doi:10.1016/j.jmarsys.2007.02.006.
- Marcus, S. L., J. O. Dickey, J. K. Willis, F. Seitz (2009): Earth oblateness changes reveal land ice contribution to interannual sea level variability. *Geophysical Research Letters*, 36(23), American Geophysical Union, ISSN 0094-8276, DOI: 10.1029/2009GL041130.
- Marte, M. A., H. Ritsch, D. F. Walls (1988); Squeezed Reservoir Lasers. *Phys. Rev. A* 38, 3577.
- Maximenko, N., P. Niiler, M.-H. Rio, O. Melnichenko, L. Centurioni, D. Chambers, V. Zlotnicki, and B. Galperin (2009): Mean dynamic topography of the ocean derived from satellite and drifting buoy data using three different techniques. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 26(9), 1910-1919.
- Mendes Cerveira, P. J., J. Boehm, H. Schuh, T. Klügel, A. Velikoseltsev, K. U. Schreiber, A. Brzezinski (2009): Earth Rotation observed by Very Long Baseline Interferometry and Ring Laser, *Pure and Applied Geophysics*, 166, 1499 – 1517, doi: 10.1007/s00024-004-0487-z.

- Montenbruck, O., A. Hauschild, U. Hessels, P. Steigenberger, U. Hugentobler (2009): CONGO: First GPS/GIOVE tracking network for science, research; *GPS World*, 20(9), 56-62, ISSN 1048-5104.
- Morelli, C. (1974): The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71), International Association of Geodesy, Special Publication No. 4.
- Neidhardt, A. (2005): Verbesserung des Datenmanagements in inhomogenen Rechnernetzen geodätischer Messeinrichtungen auf der Basis von Middleware und Dateisystemen am Beispiel der Fundamentalstation Wettzell. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Nr. 37, ISBN 3-89888-915-7.
- nestor Handbuch 2009: Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung hg. v. H. Neuroth, A. Oßwald, R. Scheffel, S. Strathmann, M. Jehn im Rahmen des Projektes: nestor – Kompetenznetzwerk Langzeitarchivierung und Langzeitverfügbarkeit digitaler Ressourcen für Deutschland, Verlag Werner Hülsbusch, Boizenburg, 2009.
- Pascual A., M.I. Pujol, G. Larnicol, P.Y. Le Traon, M.H. Rio (2007): Mesoscale mapping capabilities of multisatellite altimeter missions: First results with real data in the Mediterranean Sea. *J. Marine Systems*, 65
- Pavlis, N., S. Holmes, S. Kenyon, S. Factor (2008): An Earth Gravity Model to Degree 2160: EGM2008. Presented at EGU general Assembly 2008, Vienna, Austria.
- Petrachenko, B., A. Niell, D. Behrend, B. Corey, J. Böhm, P. Charlot, A. Collioud, J. Gipson, R. Haas, T. Hobiger, Y. Koyama, D. MacMillan, Z. Malkin, T. Nilsson, A. Pany, G. Tuccari, A. Whitney, J. Wresnik (2009): Design Aspects of the VLBI2010 System - Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee. NASA/TM-2009-214180, Greenbelt MD.
- 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.
- Pritsch, B., K. U. Schreiber, A. Velikoseltsev, J.-P. R. Wells (2007): Scale Factor Corrections in Large Ring Lasers, *Appl. Phys. Lett.* 91, 061115, doi:10.1063/1.2768639.
- Raney, R. (1998): The delay/Doppler radar altimeter, *IEEE Trans. Geosci. 472, Remote Sens.*, 36(5), 1578–1588.
- Ray, J., Z. Altamimi, X. Collilieux, T. van Dam (2008) Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates. *GPS Solutions* 12: 55-64
- Ray R. (2008) GOT4.7 ocean tide model. *Pers. Communication*
- Rice, P. R., X. Yin, J. Walden, J. Gea-Banacloche, L. M. Pedrotti, J. E. Mullen (1994): Laser with Injected Squeezed Vacuum: Phase Diffusion and Intensity Fluctuations. *Phys. Rev. A* 50, 4176.
- Richter B, W. Schwegmann (2006) IERS data and information system. In: Flury J, Rummel R, Reigber C, Rothacher M, Boedeker G, Schreiber U (eds.), *Observation of the Earth System from Space*, Springer, Berlin.
- Rio, M.-H., F. Hernandez (2004): A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model, *J. Geophys. Res.*, 109, C12032, doi:10.1029/2003JC002226.
- Rothacher, M. (2008): Global Geodetic Observing System (GGOS): Status and Future. AOGS 5th Annual Meeting 2008, June 16-20, 2008, Busan, Korea.

- Rothacher, M., H. Drewes, A. Nothnagel, B. Richter (2010): Integration of space geodetic techniques as the basis for a Global Geodetic-geophysical Observing System (GGOS-D), Springer.
- Rodríguez Solano, C. J., U. Hugentobler, P. Steigenberger (2009): Impact of albedo radiation on GPS satellites. IAG Symposium - Geodesy for Planet Earth, Springer, accepted.
- 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.
- Sánchez, L. (2009): Definition and realisation of the SIRGAS vertical reference system within a globally unified height system. Springer, IAG Symposia, Vol. 130, 638-645.
- Sánchez, L. (2009): Approach for the establishment of a global vertical reference level. Springer, IAG Symposia, Vol. 132, 119-125.
- Sánchez, L. (2009): Strategy to establish a global vertical reference system. Springer, IAG Symposia, Vol. 134, 273-278, doi:10.1007/978-642-3-00860-3_42.
- Sánchez, L., W. Bosch (2009): The role of the TIGA project in the unification of classical height systems. Springer, IAG Symposia, Vol. 134, 285-290, doi:10.1007/978-3-642-00860-3_44.
- Sánchez, L., C. Brunini (2009): Achievements and Challenges of SIRGAS. In: Drewes, H. (Ed.): Geodetic Reference Frames, IAG Symposia, Springer, Vol. 134, 161-166, DOI: 10.1007/978-3-642-00860-3_25.
- Sandwell, D. T., W. H. F. Smith (2009): Global marine gravity from re-tracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. *J. Geophys. Res.* (114) B01411, 18pp, doi:10.1029/2008JB006008.
- Savcenko R., W. Bosch (2008): EOT08a – empirical ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. DGFI Report No. 81, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI), München.
- Schmidt, M., M. Fengler, T. Mayer-Gürr, A. Eicker, J. Kusche, L. Sanchez, S.-C. Han (2007): Regional gravity modeling in terms of spherical base functions. *Journal of Geodesy*, 81(1), 17-38, DOI:10.1007/s00190-006-0101-5.
- Schmidt, M. (2007): Wavelet modelling in support of IRI. *Adv. Space Res.*, 39, 932-940, doi:10.1016/j.asr.2006.09.030.
- Schmidt, M., D. Bilitza, C. K. Shum, C. Zeilhofer (2007): Regional 4-D modeling of the ionospheric electron content. *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2007.02.050.
- Schmidt, M., O. Fabert (2008): Multi-Resolution Representation of the Gravity Field Based on Ellipsoidal Wavelets. OSU Report 487, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Schmidt, M., F. Seitz, C. K. Shum (2008): Regional four-dimensional hydrological mass variations from GRACE, atmospheric flux convergence, and river gauge data. *Journal of Geophysical Research*, 113(B10), DOI: 10.1029/2008JB005575.
- Schmidt, M., O. Fabert (2008): Multi-Resolution Representation of the Gravity Field Based on Ellipsoidal Wavelets. OSU Report 487, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Schmidt, M., Fengler, M., Mayer-Gürr, T., Eicker, A., Kusche, J., Sanchez, L., Han, S.-C. (2007): Regional gravity modeling in terms of spherical base functions. *Journal of Geodesy*, 81(1), 17-38, doi:10.1007/s00190-006-0101-5.

- Schmidt, M., F. Seitz (2008): Die Wasserspeicher Mitteleuropas - beobachtet aus dem Weltall. Akademie Aktuell - Zeitschrift der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Nr. 3, 36-39, ISSN 1436-753X.
- Schneider, M. (Ed.) (1990): Satellitengeodäsie - Ergebnisse aus dem gleichnamigen Sonderforschungsbereich der Technischen Universität München. Deutsche Forschungsgemeinschaft, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Schuh, H., R. Dill, H. Greiner-Mai, H. Kutterer, J. Müller, A. Nothnagel, B. Richter, M. Rothacher, U. Schreiber, M. Soffel (2003): Erdrotation und globale dynamische Prozesse. Stand und Ziele der Modellbildung, der Mess- und der Auswerteverfahren. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a. M.
- Schwegmann W, B. Richter (2010): GGOS-D Data Management – From Data to Knowledge. In: Flechtner, F., Gruber, T., Güntner, A., Manda, M., Rothacher, M., Schöne, T., Wickert, J. (eds.), System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques from Space, Springer, Berlin, ISBN 978-3-642-10227-1, DOI 10.1007/978-3-642-10228-8.
- Seitz, F., H. Kutterer (2002): Numerical solutions for the non-linear Liouville equation. In: Adam, J., K.-P. Schwarz (Eds): Vistas for Geodesy in the New Millennium, IAG Symposia, 125, 463-468, Springer, Berlin.
- Seitz, F. (2004): Atmosphärische und ozeanische Einflüsse auf die Rotation der Erde - Numerische Untersuchungen mit einem dynamischen Erdsystemmodell; DGK, Reihe C, Heft 578, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, ISBN 978-3-7696-5017-4.
- Seitz, F. (2005a): Atmospheric and oceanic influences on polar motion - results of two independent model combinations, Artificial Satellites, 40(3), 199-215.
- Seitz, F. (2005b): Zur Anregung der Chandler-Schwingung. Zeitschrift für Vermessungswesen, 130(3), 166-173.
- Seitz, F., H. Kutterer (2005): Sensitivity analysis of the non-linear Liouville equation. In: Sansò F. (Eds): A Window on the Future of Geodesy, IAG Symposia, 128, 601-606, Springer, Berlin.
- Seitz, F., J. Stuck, and M. Thomas (2005): White noise Chandler wobble excitation. In: Forcing of polar motion in the Chandler frequency band: A contribution to understanding interannual climate variations, Plag, H. et al. (Eds), Cah. Cent. Eur. Geodyn. Seismol., 24, ECGS, Luxembourg, 15-21.
- Seitz, F., M. Schmidt (2005): Atmospheric and oceanic contributions to Chandler wobble excitation determined by wavelet filtering. J. Geophys. Res., 110, B11406, doi: 10.1029/2005JB003826.
- Seitz, F., M. Schmidt (2007): Hydrological mass variations due to extreme weather situations in Central Europe from global and regional GRACE expansions. in: Benveniste, J.; Berry, P., Calmant, S., Grabs, W., Kosuth, P. (eds.) Proceedings of the 2nd Space for Hydrology Workshop 'Surface Water Storage and Runoff: Modeling, In-Situ Data and Remote Sensing', ESA Publication WPP-280.
- Seitz, F., M. Schmidt, C. K. Shum (2008): Signals of extreme weather conditions in Central Europe in GRACE 4-D hydrological mass variations. Earth and Planetary Science Letters, 268(1-2), 165-170, ISSN 0012-821X, DOI: 10.1016/j.epsl.2008.01.001.
- Seitz, F., H. Drewes (2009): Simulation of polar motion with a dynamic Earth system model over a period of 200 years (1860-2060); in: Soffel, M.; Capitaine, N. (eds.) Proceedings of the 'Journées 2008 Systèmes de Référence Spatio-temporels', 123-126.

- Seitz, F., M. Krügel (2009): Inverse model approach for vertical load deformations in consideration of crustal inhomogeneities; in: Drewes, H. (eds.) Geodetic Reference Frames, IAG Symposia, Vol. 134, 23-29, Springer.
- Seitz, M. (2009): Kombination geodätischer Raumberechnungsverfahren zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems. DGK, Reihe C, Heft 630, München.
- Siegman, A. E. (1986): Lasers, University Science Books, Mill Valley, California.
- Steigenberger, P., U. Hugentobler, S. Lutz, R. Dach (2009): CODE contribution to the IGS reprocessing. Proc. of High Performance Computing in Science and Engineering, Garching 2009, Springer, eingereicht.
- Steigenberger, P., U. Hugentobler, O. Montenbruck, A. Hauschild (2010): Precise Orbit Determination of GIOVE-B Based on the CONGO Network, submitted to Journal of Geodesy.
- Sterr, U., Degenhardt, C., Stoehr, H., Lisdat, Ch., Schnatz, H., Helmcke, J., Riehle, F., Wilpers, G., Oates, Ch., Hollberg, L., (2004) The optical calcium frequency standards of PTB and NIST, Comptes Rendus Physique, 5, No. 8, 845 – 855.
- Švehla, D, M. Rothacher (2002): Kinematic and reduced-dynamic precise orbit determination of low earth orbiters, Advances in Geosciences, 1, 47-56, 2003.
- Tang, C. L., H. Statz (1967): Phase-Locking of Laser Oscillators by Injected Signal. J. Appl. Phys. 38, 323 (1967), doi: 10.1063/1.1708974.
- Thaller, D., V. Tesmer, R. Dach, M. Krügel, M. Rothacher, P. Steigenberger (2008): Combining VLBI Intensive with GPS Rapid solutions for deriving a stable UT time series. In: Finkelstein, A.; Behrend, D. (eds.) Measuring the Future, Proceedings of the Fifth IVS General Meeting, pp 8-13, ISBN (Print) 978-5-02-025332-2.
- Urschl, C., G. Beutler, W. Gurtner, U. Hugentobler, S. Schaer (2007): Contribution of SLR tracking data to GNSS orbit determination. Adv. in Space Res., 39(10), 1515-1523, doi: 10.1016/j.asr.2007.01.038.
- Walls, D. F. (1983): Squeezed States of Light, Nature 306, 141.
- Winkelkemper, T., F. Seitz, S.K. Min, A. Hense (2008): Simulation of historic and future atmospheric angular momentum effects on length-of-day variations with GCMs; in: Sideris, M.G. (eds.) Observing our Changing Earth, IAG Symposia, Vol. 133, 447-454, Springer.
- Zeilhofer, C. (2008): Multi-dimensional B-spline modeling of spatio-temporal ionospheric signals. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe A, 123, München.
- Ziebart, M., S. Adhya, A. Sibthorpe, S. Edwards, P. Cross (2005): Combined radiation pressure and thermal modelling of complex satellites: Algorithms and on-orbit tests. Advances in Space Research 36, 424-430.

10 Häufig verwendete Abkürzungen

AAM	Atmospheric Angular Momentum, atmosphärisches Drehmoment
APKIM	Aktuelle plattenkinematische Modelle
AWI	Alfred Wegener Institut, Bremerhaven
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BCRS	Barycentric Celestial Reference System, baryzentrische Himmelsreferenzsystem
BIPM	Bureau International de Poids et Mesures
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main
CGE	Centrum für Geodätische Erdsystemforschung
CHAMP	Challenging Mini Satellite Payload
COL	Combination at Observation Level
CRF	Celestial Reference Frame, himmelfestes Bezugssystem
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München
DGK	Deutsche Geodätische Kommission
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DORIS	Détermination d'orbite et radiopositionnement intégrés par satellite, französisches Satellitenbahnbeobachtungssystem
DOT	Dynamische Ozeantopographie
ECMWF	European Centre for Mean Weather Forecast
EGG-C	European GOCE Gravity Consortium
EOF	Empirische Orthogonalitätsfunktionen
EOP	Erdorientierungsparameter
ERP	Erdrotationsparameter
ESA	European Space Agency
FESG	Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie
GCOS	Global Climate Observing System
GEO	Intergovernmental Group on Earth Observation
GEOS	Global Earth Observation System
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems
GFZ	GeoForschungsZentrum, Potsdam
GGFC	IERS Global Geophysical Fluids Centres
GGOS	Global Geodetic Observing System
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema, russisches Navigationssystem
GMES	Global Monitoring of Environment and Security
GNSS	Global Navigation Satellite System

GOCE	Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer
GOOS	Global Ocean Observing System
GPS	Global Positioning System (amerikanisches Navigationssystem)
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRAF	German Reference Frame
IAG	Internationale Assoziation für Geodäsie
IAPG	Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München
IAS	Institute for Advanced Study der Technischen Universität München
IAU	Internationale Astronomische Union
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IERS	International Earth rotation and Reference Systems Service
IGG	Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn
IGS	International GPS Service
IRI	International Reference Ionosphere
ILRS	International Laser Ranging Service
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRF2000	International Terrestrial Reference Frame 2000
ITRS	International Terrestrial Reference System
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
LLR	Lunar Laser Ranging, Laserentfernungsmessungen zum Mond
LMU	Ludwig-Maximilian-Universität München
LOD	Length of day, Tageslänge
MERIT	Monitoring the Earth Rotation and Intercompare the Technique
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MVA	Multi-Version Altimetry
MSD	Multi-Skalen-Darstellung
NASA	National Air and Space Agency, USA
NCEP	National Center of Environmental Prediction, USA
NPL	National Physical Laboratory
OMCT	Ocean Model for Circulation and Tides
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RTW	Radioteleskop Wettzell

SAR	Synthetic Aperture Radar
SINEX	Software Independent Exchange Format
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (Südamerikanisches geozentrisches Referenzsystem)
SLR	Satellite Laser Ranging, Laserentfernungsmessungen zu künstlichen Erdsatelliten
SOS-W	Satellite Observing System Wettzell
SST	Satellite-to-Satellite Tracking
TAI	Temps Atomique International
TIGA	Tide GAuge benchmark monitoring project
TIGO	Transportables Integriertes Geodätisches Observatorium
TRF	Terrestrial Reference Frame
TT	Terrestrial Time
TTW	Twin Telescope Wettzell
UT	Universal Time, Weltzeit
UTC	Universal Time Coordinated
VLBI	Very Long Baseline Interferometrie
WLRS	Wettzell Laser Ranging System
XML	eXtensible Markup Language