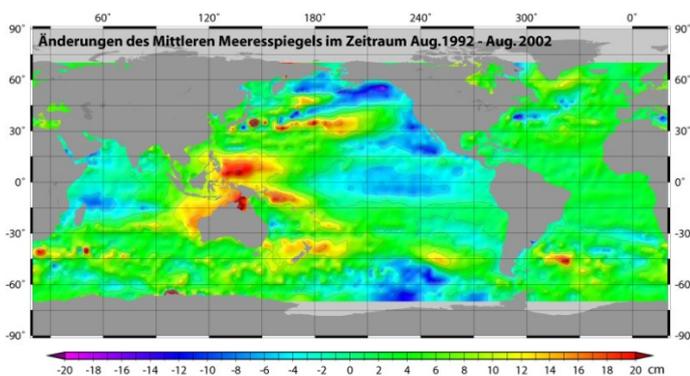
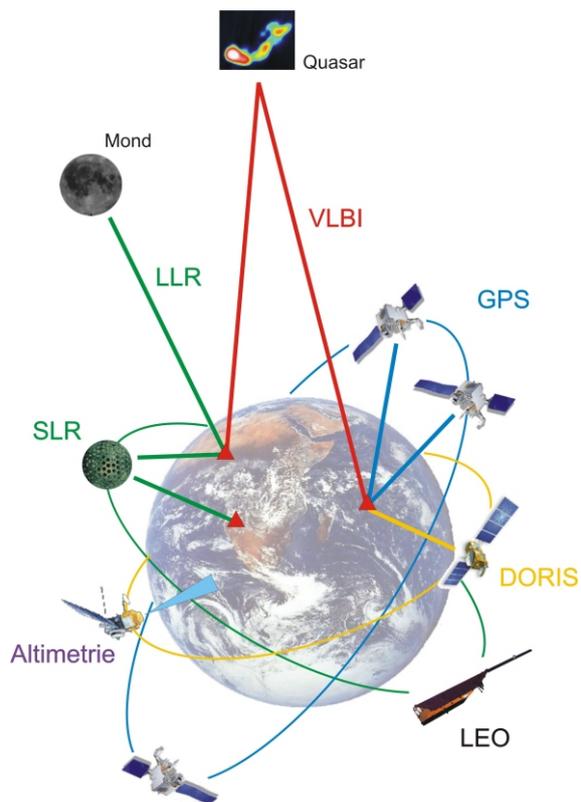


# FORSCHUNGS- GRUPPE SATELLITEN GEODÄSIE



FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSPROGRAMM  
2006 - 2010

**Forschungsgruppe Satellitengeodäsie**

**FGS**

**Forschungs- und Entwicklungsprogramm**

**2006 – 2010**

**München, Frankfurt, Bonn  
Juli 2005**

### **Abbildungen auf der Titelseite:**

Linke Spalte oben: Kombination der geodätischen Raumverfahren  
Linke Spalte unten: Änderung des mittleren Meeresspiegels  
im Zeitraum August 1992 – August 2002

Rechte Spalte oben: Projektstudie GOCE  
Rechte Spalte mitte: Radioteleskop O'Higgins, Antarktis  
Rechte Spalte unten: Das transportable Integrierte Geodätische  
Observatorium TIGO, Concepción, Chile

# Vorwort

Das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsprogramm gilt für die Jahre 2006 bis 2010. In wesentlichen Teilen schreibt es das Programm der Jahre 2000 bis 2005 fort. Mit ihm soll einerseits ein geodätischer Beitrag zur Erfassung und Erforschung des „Systems Erde“ und zum Aufbau des „Global Geodetic Observing System“ der Internationalen Assoziation der Geodäsie geleistet werden. Andererseits ist es, vor dem Hintergrund der Aufgaben des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, ein Beitrag zur Bereitstellung eines konsistenten und genauen Systems von Bezugsrahmen als Grundlage für alle Geoinformationssysteme. Die Definition, Realisierung und Erhaltung von Bezugssystemen ist zentrales Thema des Programms.

Die FGS orientiert sich mit ihrem Forschungsprogramm an den internationalen Entwicklungen. In Anbetracht der Anforderungen bei der Realisierung eines globalen geodätischen Beobachtungssystems sind diese gekennzeichnet durch:

- Erhalt und Weiterentwicklung der kleinen Anzahl von Fundamentalstationen zur Realisierung eines sehr genauen globalen Bezugssystems,
- die zunehmende Automatisierung und Echtzeitnähe der eingesetzten Beobachtungsverfahren,
- die weitere Steigerung der Messgenauigkeit der vorhandenen geodätischen Raumverfahren und deren Verknüpfung,
- die Ergänzung der Erfassung von Geometrie und Orientierung des Erdkörpers durch eine ebenso genaue Bestimmung der räumlichen und zeitlichen Variationen des Erdschwerefelds,
- die verstärkte Integration von Verfahren in einem konsistenten Auswertemodell und
- die wissenschaftliche Nutzung der geodätischen Produkte in der Erdsystemforschung in Zusammenarbeit mit den benachbarten Erdwissenschaften.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) werden zu diesem Zweck in internationale Programme und wissenschaftlichen Dienste eingebunden.

Im Jahr 2004 erging an den Sprecher der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie, Herrn Univ.-Prof. Dr. Markus Rothacher, ein Ruf auf die Professur „Satellitengeodäsie und Erdsystemforschung“ an der Technischen Universität Berlin, verbunden mit der Position des Direktors der Abteilung „Geodäsie und Fernerkundung“ (Nachfolge Professor Reigber) des GeoForschungsZentrums Potsdam. Nach Rufannahme wurde Herr Rothacher mit Wirkung vom 23. Dezember 2004 auf diese Position berufen.

Herr Kollege Rothacher hat in den fünf Jahren seines Wirkens Programm und Inhalte der Forschungsarbeiten der FGS entscheidend geprägt. Insbesondere die Arbeiten zur wissenschaftlichen Nutzung des GPS, zur Integration der geodätischen Raumverfahren und zum Aufbau eines globalen Beobachtungssystems wurden entscheidend vorangebracht. Auch bei der internationalen und nationalen Positionierung der FGS hat sich Herr Rothacher große Verdienste erworben. Die FGS bedankt sich sehr herzlich bei Herrn Rothacher und wünscht ihm viel Erfolg an seinen beiden neuen Wirkungsstätten.

Gleichzeitig ergeht der Wunsch nach einer fortgesetzt engen Zusammenarbeit. Aus einer vertieften Kooperation von FGS und GFZ könnten sehr wichtige neue Impulse für Geodäsie und Erdwissenschaften erwachsen.

Die Begutachtung des Programms der FGS fällt somit in eine Interimsperiode, in der nach einem würdigen Nachfolger für die Professur „Satellitengeodäsie“ an der TU München, die Leitung der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie und die Sprecherfunktion der FGS gesucht wird.

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

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

München, im Juli 2005

R. Rummel

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Forschungsprogramm der FGS – Rückblick und Ziele</b> .....	<b>9</b>
1.1 Globales Geodätisches Beobachtungssystem .....	9
1.2 Geodätische Raumverfahren – Wettzell, Concepción und O’Higgins.....	10
1.3 Einbindung der Arbeiten der FGS in die operationellen Dienste der IAG .....	16
1.4 Neue Generation Schwerefeldsatellitenmissionen .....	17
<b>2 Beobachtungsbeiträge der FGS</b> .....	<b>19</b>
2.1 Die Fundamentalstation Wettzell .....	20
2.1.1 Das 20m Radioteleskop für geodätische und astrometrische VLBI .....	21
2.1.2 Korrelator .....	23
2.1.3 Laserentfernungsmessungen .....	24
2.1.4 Großringlaser „G“ .....	28
2.1.5 Gravimetrische Messungen.....	32
2.1.6 Grunddienste, lokale Messsysteme.....	32
2.1.7 Fachspezifische Informationstechnologie der Fundamentalstation Wettzell.....	35
2.2 Das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium TIGO .....	38
2.2.1 TIGO VLBI-Modul .....	39
2.2.2 TIGO SLR- Modul.....	40
2.2.3 TIGO- Basismodul .....	41
2.3 German Antarctic Receiving Station, GARS-O’Higgins.....	43
2.4 GNSS-Beobachtungsstationen .....	45
2.5 Tabellarische Zusammenfassung der Ziele .....	50
<b>3 Datenaufbereitung und -archivierung</b> .....	<b>53</b>
3.1 Anforderungen an einen echtzeitnahen Datentransport .....	53
3.1.1 Möglichkeiten einer echtzeitnahen VLBI-Korrelation.....	53
3.1.2 Verbesserte Datenaufbereitung für Anwendungen im Bereich GPS, SLR und DORIS.....	56
3.2 Datenhaltung und Informationsgewinnung .....	57
3.2.1 Erweiterung des IERS Daten- und Informationssystems .....	57
3.2.2 FGS Methodenbank, Verknüpfung der geodätisch- geophysikalischen Zeitreihen mit Modellen zur Erdrotation .....	58
3.3 Metadatenkatalog.....	60
3.4 Tabellarische Zusammenfassung der Ziele .....	62

<b>4</b>	<b>Geometrie, Orientierung und Schwerfeld der Erde: Methodische Grundlagen und Verfahren.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Geodätische Punktfelder.....</b>	<b>64</b>
4.1.1	Stand der Forschung .....	64
4.1.2	Forschungsziele.....	66
<b>4.2</b>	<b>Orientierung und Rotation der Erde.....</b>	<b>69</b>
4.2.1	Stand der Forschung .....	69
4.2.2	Forschungsziele.....	69
<b>4.3</b>	<b>Meeresoberfläche.....</b>	<b>72</b>
4.3.1	Stand der Forschung .....	72
4.3.2	Forschungsziele.....	73
<b>4.4</b>	<b>Schwerfeld .....</b>	<b>76</b>
4.4.1	Stand der Forschung .....	76
4.4.2	Forschungsziele.....	77
<b>4.5</b>	<b>Kombinierte Verfahren .....</b>	<b>79</b>
4.5.1	Stand der Forschung .....	79
4.5.2	Forschungsziele.....	81
<b>4.6</b>	<b>Tabellarische Zusammenfassung der Ziele .....</b>	<b>84</b>
<b>5</b>	<b>Verbindung mit Erdwissenschaften.....</b>	<b>87</b>
5.1	Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde .....	87
5.2	Erdrotation.....	90
<b>6</b>	<b>Deutsche Beteiligung an den internationalen Diensten IERS, IGS, ILRS, IVS.....</b>	<b>92</b>
<b>7</b>	<b>Verantwortungsbereiche innerhalb der FGS.....</b>	<b>94</b>
<b>8</b>	<b>Haushaltmäßige Sicherung des Programms.....</b>	<b>96</b>
<b>9</b>	<b>Zitierte Literatur.....</b>	<b>102</b>
<b>10</b>	<b>Häufig verwendete Abkürzungen.....</b>	<b>104</b>

## Zusammenfassung

Die drei Ziele der Geodäsie in Wissenschaft und Anwendung sind die Bestimmung der Erdfigur in Raum und Zeit, der Orientierung des Erdkörpers im Raum und des Schwerfelds der Erde. Im Programm 2001 - 2005 wurden grundlegende Beiträge zur Kombination der Raumverfahren für die internationalen Dienste erbracht.

Für 2006 - 2010 ist die Kombination von geometrischen und gravimetrischen Verfahren zur Integration des Raum- und Schwerebezugssystems ein Schwerpunkt.

Für die Erdwissenschaften sollen alle Prozesse im Gesamtsystem, welche die Erdgestalt und Massenverteilung beeinflussen global vergleichbar und quantifizierbar werden. Die globale Synchronisation in Raum und Zeit ist Voraussetzung für die quantitative Analyse von Massenanomalien, Massentransporten und Massenaustausch im Erdsystem. Es ist ein langfristiges Ziel der FGS einen globalen Bezugsrahmen, der diesen Ansprüchen genügt, zu realisieren. Gleichzeitig soll den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der FGS ein Beitrag zu dem von der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) initiierten Projekt „Global Geodetic Observing System“ geleistet werden.

Für die Anwender von Geodaten werden hiermit die Voraussetzungen für eine weltweit einheitliche Referenzierung in Lage und Höhe geschaffen.

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

- mehrere Hundert über die Erde verteilte Beobachtungsstationen synchron, gleichsam wie ein erdumspannendes Großinstrument operieren,
- Echtzeitanwendungen geodätischer Beobachtungen, die heute in Anbetracht zunehmender Naturkatastrophen an Bedeutung gewinnen, durch schnellen Datentransport und automatisierte Datenanalyse verbreitert werden,
- neue theoretische und methodische Ansätze zur Datenmodellierung für die Kombination von Raum- und Schwerebezugssystem zur Anwendung kommen,
- die Ergebnisse der Satellitenschwerefeldmissionen für die globale Geodäsie und benachbarte Geodisziplinen mit vergleichbarer Genauigkeit wie die Punktbestimmung und Erdrotation zur Verfügung stehen und
- das geplante europäische Satellitennavigationssystem Galileo für die Stabilisierung der europäischen Referenzsysteme eingesetzt werden kann.

Diese Ziele sollen über folgende Projekte erreicht werden:

- Ausbau und Weiterentwicklung der bestehenden Meßsysteme auf der Fundamentalstation Wettzell: Das Observatorium Wettzell erlaubt die direkte Rückkopplung der theoretischen und methodischen Erkenntnisse der FGS. Für Wettzell, TIGO und O'Higgins steht für den Bezugszeitraum eine Modernisierung der Gerätesysteme an - Kap. 2.1 – 2.3.
- Datenaufbereitung und –archivierung: Einsatz von internationalen Standards und neuer Technologien für eine Homogenisierung der geodätischen Datenbestände und die echtzeitnahe Bereitstellung der geodätischen Produkte der Dienste für die benachbarten Geowissenschaften und Nutzern von Positionierungsinformationen – Kap. 3,

- Geodätische Punktfelder: Verbesserung der Modelle zur echtzeitnahen Parameterschätzung und Kombination von Verfahren und Referenzsystemen – Kap. 4.1,
- Orientierung und Position der Erde: Realisierung eines neuen Modells zur Erdrotation und Steigerung der Genauigkeit und Auflösung der EOP – Kap. 4.2,
- Meeresoberfläche: Beschreibung der Dynamik des Meeresspiegels und Verbesserung der Bereitstellung in Verbindung mit wichtigen geophysikalischen Anwendungen– Kap. 4.3,
- Schwerefeld: Teilnahme an der Realisierung der Schwerefeldsatellitenmission GOCE, Entwicklung von methodischen Ansätzen für die raum-zeitliche Analyse der Daten der Missionen CHAMP, GRACE und GOCE und Kombination verschiedener gravimetrischer Datenserien und globaler und regionaler Darstellungen des Schwerefeldes – Kap. 4.4,
- Kombinierte Verfahren: Kombination des geometrischen und gravimetrischen Raumbezugs – Kap. 4.5,

Mit einigen Pilotprojekten sollen zukünftige Entwicklungen vorbereitet werden:

- Objektorientierte Methodendatenbank (Astro-Toolbox) – Kap. 2.5.1,
- Refraktionsserver für geodätische Beobachtungen– Kap. 2.5.2,
- Richtungsmessungen zu verschiedenen Quellen – Kap. 2.5.3,
- Management geodätischer Zeitreihen – Kap. 2.5.4,
- Transponder für SLR-Messungen – Kap. 2.5.5.

# 1 Forschungsprogramm der FGS – Rückblick und Ziele

In diesem Abschnitt wird der Gesamtrahmen des Forschungsprogramms der FGS skizziert, aus dem sich auch die Programmziele für die kommenden fünf Jahre ableiten. Es werden einerseits die Arbeiten 2001 – 2005 analysiert und andererseits die geplanten Vorhaben kurz dargestellt.

## 1.1 Globales Geodätisches Beobachtungssystem

Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie sieht ihr Forschungsprogramm eingebettet in den Gesamtrahmen der Erforschung des Erdsystems. Dies ist nicht neu; bereits in der Zeit des Sonderforschungsbereiches 78 „Satellitengeodäsie“ wurden die Arbeiten und die instrumentelle Entwicklung des Observatoriums Wettzell an diesen Zielen ausgerichtet. Die Beiträge zum internationalen Geodynamics Project in den achtziger Jahren waren Teil dieser Strategie, obgleich sich dieses Programm nur auf das Teilsystem „Dynamik der festen Erde“ bezog. Im Rahmen des 1998 in München stattgefundenen IAG-Symposiums „Integrated Global Geodetic Observing System (IG-GOS)“ (Rummel et al., 2000) konnte der Gedanke eines abgestimmten, geodätischen Beitrags zur Erdsystemforschung entscheidend vorgebracht und international in der Geodäsie etabliert werden. Der Grundgedanke ist die Verknüpfung der drei geodätischen Pfeiler Erdfigur-, Erdrotations- und Gravitationsfeldbestimmung, um aus dieser Verbindung neben den Veränderungen der Erdfigur Massenanomalien in der Erde, Massentransporte in Atmosphäre, Ozeanen und Eiskappen, sowie Massenaustausch zwischen den Systemkomponenten global erfassen und bilanzieren zu können. Die Verknüpfung in einem globalen, erdfesten Bezugssystem mit Hilfe der geodätischen Raumverfahren sollte dabei mit einer Relativgenauigkeit von  $10^{-9}$  und frei von räumlichen und zeitlichen Verformungen erfolgen. Der Vorschlag des Aufbaus eines globalen Beobachtungssystems wurde von der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) unter dem Projektnamen „Global Geodetic Observing System (GGOS)“ aufgegriffen und wird gegenwärtig als Leitprojekt inhaltlich konkretisiert und organisatorisch vorbereitet. Gleichzeitig wählte die deutsche Geodäsie dieses Vorhaben zur thematischen Grundlage des Forschungsprogramms „Beobachtung des Systems Erde aus dem Weltraum“, das als Thema 2 des Geotechnologienprogramms seit 2002 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird. Auch die geodätisch-geodynamischen Satellitenmissionen CHAMP, GRACE und GOCE sind vor diesem Hintergrund zu sehen. Sie wurden als Beiträge zur Erforschung des Erdsystems konzipiert, vgl. das ESA-Dokument „The Science and Research Elements of ESA's Living Planet Project“ (1998) oder die U.S. National Research Council-Studie „Satellite Gravity and the Geosphere“ (1997). Diese Missionen sind daher ein wesentliches Element des oben genannten Konzeptes für ein globales geodätisches Beobachtungssystem. Das Beobachtungssystem ist Mittel zum Zweck. Die wissenschaftliche Nutzung erfolgt in Zusammenarbeit mit Geophysik, Glaziologie, Ozeanographie und Hydrologie. Mit diesem Ziel wurde der DFG-Schwerpunkt „Mass Transport and Mass Distribution in the Earth System“ konzipiert, mit dem die wissenschaftliche Nutzung des geodätischen Beobachtungssystems sichergestellt werden soll. Dieser Schwerpunkt wurde (im zweiten Anlauf) im Mai 2005 durch die DFG genehmigt, vgl. die Denkschrift Ilk et al., 2005. Im Bereich Erdrotation wird die deutsche Forschung zudem durch die genehmigte DFG-Forschergruppe „Earth Rotation and Global Dynamic Processes“ gefördert (Schuh et al., 2003).

Mit den Satellitenmissionen, dem Geotechnologienprogramm, der DFG-Forschergruppe und dem DFG-Schwerpunktprogramm konnte in Deutschland die Kette von den Beobachtungsverfahren bis zu deren Nutzung in der Erdsystemforschung geschlossen werden. Gleichzeitig wird dadurch ein wesentlicher Beitrag zum geplanten Globalen Geodätischen Beobachtungssystem GGOS der IAG ermöglicht. Das vorliegende Forschungsprogramm ist vor diesem Hintergrund zu sehen.

## 1.2 Geodätische Raumverfahren – Wettzell, Concepción und O’Higgins

Grundvoraussetzung für den Aufbau eines Globalen Geodätischen Beobachtungssystems ist die Verknüpfung von Erdfigur-, Erdrotation- und Schwerefeldbestimmung in einem globalen Bezugssystem. Die erforderliche Relativgenauigkeit ist  $10^{-9}$  (1.p.p.b. = 1 part per billion = 1 Milliardstel). Dies bedeutet, dass mehrere Hundert über die Erde verteilte Beobachtungsstationen synchron, gleichsam wie ein erdumspannendes Großinstrument zu operieren haben. Es bedeutet auch, dass die unterschiedlichen, sich ergänzenden Raumverfahren wie geodätische Radiointerferometrie (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR) und Lunar Laser Ranging (LLR), satelliten-gestützte Navigationssysteme (GNSS) sowie das französische Trackingsystem DORIS perfekt aufeinander abgestimmt sein müssen. Eine möglichst echtzeitnahe Übertragung und Auswertung der Messdaten ist notwendig, um die Gefahren von Katastrophenereignissen mindern zu helfen. Nur dann werden Veränderungen der Erdgestalt, der Eismassen, der Meeresoberflächen und des Schwerefelds global vergleichbar und schnell erfassbar, um u.a. belastbare Vorhersagemodelle entwickeln zu können.

Hochgenaue und kontinuierliche Beobachtungsserien aller Messverfahren in einem globalen, international koordinierten Netz sind unabdingbar notwendig für den Erfolg eines globalen Beobachtungssystems. Fundamentalstationen, d.h. Stationen auf denen gleichzeitig verschiedene Techniken zum Einsatz kommen, spielen dabei eine Schlüsselrolle, denn nur sie erlauben eine strenge Kombination der Messverfahren. Die Forschungsgruppe leistet mit den Fundamentalstationen Wettzell und TIGO, aber auch mit der Station O’Higgins / Antarktis und den zahlreichen permanent eingerichteten GNSS-Stationen (GPS tlw. auch GLONASS) einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung dieser Zielsetzungen. Gleichzeitig eröffnen diese Beiträge der FGS den Zugang zu den Beobachtungen der anderen geodätischen Stationen.

Kristallisationspunkt des Forschungsprogramms der FGS sind die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der Fundamentalstation Wettzell und mittlerweile auch die in Concepción / Chile. Die zurückliegenden und geplanten Arbeiten sollen im Folgenden vor dem Hintergrund der Realisierung eines globalen Beobachtungssystems zusammengefasst werden.

Die Realisierung eines globalen, erdfesten Referenzrahmens und dessen Bezug zu einem raumfesten System erfolgt über vier unabhängige, sich ergänzende Beobachtungsverfahren:

- Very Long Baseline Interferometry (VLBI)  
An geodätischem VLBI sind weltweit etwa 30 Radioteleskope beteiligt. Es ist ein Verfahren, das a priori hochgenaue interkontinentale Basislinien liefert, im Verbund aber auch Positionen und deren Geschwindigkeit. Es realisiert durch die Beobachtung von Quasaren den Bezug zum raumfesten Bezugssystem. Es ist das einzige Verfahren, das die Bestimmung des kompletten Satzes der Erdrotationsparameter (Präzession, Nutation, Polbewegung und UT1) erlaubt. Neben der Ableitung geophysikalischer Zeitreihen und Parameter zur Beschreibung der Atmosphäre und Ionosphäre,

leistet es auch signifikanteste Beiträge zur Bestätigung der Relativitätstheorie.

- **Laserentfernungsmessungen zu Satelliten (SLR) und zum Mond (LLR)**

An SLR sind weltweit etwa vierzig Stationen beteiligt. Nur noch zwei Stationen führen derzeit Entfernungsmessungen zum Mond aus. Das Verfahren liefert hochgenaue Satellitenephemeriden, Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten. Wesentlich ist der Bezug zum Massenzentrum. SLR und LLR liefern Aussagen über die Polbewegung und über geophysikalische Parameter der Erde, insbesondere über die niedrigen sphärisch-harmonischen Koeffizienten des Schwerefeldes und deren zeitliche Änderungen. Aus den langen Messreihen zum Mond (und zu den LAGEOS-Satelliten) konnten hervorragende Zwangsbedingungen zur Eingrenzung von Modellen der allgemeinen Relativitätstheorie abgeleitet werden. Noch nie zuvor waren so viele mit Laserreflektoren ausgestattete Satelliten in einer Erdumlaufbahn. Die Entfernungsmessungen zum Mond erzeugen wichtige Erkenntnisse zur Erde-Mond-Theorie und zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sie stützen als unabhängige Messungen auch die Beobachtung der Drehgeschwindigkeit der Erde (UT1-UTC).

- **GNSS (GPS, GLONASS und künftig das europäische Galileo)**

GPS kann sich auf ein globales Netz von weit über 200 Stationen, teilweise auch mit GLONASS-Empfänger ausgerüstet, stützen. Die kontinentale Verdichtung (z. B. EUREF, SIRGAS) erfolgt mit über 300 Stationen und auf nationaler und regionaler Ebene für Landesvermessung oder Frühwarnsysteme sind es sogar mehrere 1000 Stationen. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Wirtschaftlichkeit und Vielseitigkeit aus. Es erlaubt eine hochgenaue und kontinuierliche Positionsbestimmung unabhängig von Wetterbedingungen. Bestimmbar sind echtzeitnahe Bahnephemeriden, Uhrenkorrekturen für Satelliten und Stationen, Stationskoordinaten, Erdrotationsparameter, Ionosphären- und Troposphärenparameter. Die Ausstattung von erdwissenschaftlichen Satelliten (Eis- und Ozeanaltimetrie, In-SAR, Magnetfeld, Schwerefeld, Atmosphärensondierung) mit GPS-Empfängern ermöglicht zudem die direkte Integration der Meßsysteme dieser Satelliten in das Globale Geodätische Beobachtungssystem.

- **DORIS**

Dies ist ein in Frankreich entwickeltes Mikrowellentrackingsystem mittlerer Genauigkeit, das sich auf über 50 Stationen, mit einer sehr guten, gleichmäßigen globalen Verteilung, stützen kann. Dieses System dient in erster Linie der Bestimmung von Satellitenbahndaten, insbesondere von Fernerkundungssatelliten, die mit DORIS ausgestattet sind. Es liefert aber auch geodätische Parameter, wie Stationskoordinaten, Polbewegung etc. Nachteilig wirkt sich aus, dass ein Satellit, der mit DORIS ausgestattet ist, beim Überflug jeweils nur 4 Bodenstationen empfangen kann. Außerdem führen die aktiv sendenden Bodenstationen auf VLBI-Stationen zu Interferenzstörungen. Operationell sind die Beobachtungsdaten nur über die DORIS-Zentrale mit einer zeitlichen Verzögerung verfügbar.

Auf Internationaler Ebene haben sich im Rahmen der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) für die einzelnen Techniken Dienste etabliert, durch die die internationalen Aktivitäten koordiniert und dem Nutzer aufbereitete Produkte angeboten werden. Es sind dies der

- International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS),
- International Laser Ranging Service (ILRS),
- International GNSS Service (IGS) und
- International DORIS Service (IDS).

Eine Voraussetzung für die globale Synchronisation der Messreihen und die Synchronisation der geodätischen Raumverfahren untereinander ist eine äußerst genaue Zeithaltung und Zeitübertragung sowie der Aufbau eines Systems mit dem sich eine möglichst echtzeitnahe Datenübertragung und -auswertung durchführen lässt.

In Tabelle 1.1 sind die mit diesen Systemen bestimmbaren Parametergruppen und die Komplementarität dieser Verfahren dargestellt. Abbildung 1.1 gibt eine Übersicht über die globale Verteilung der Beobachtungsstationen.

Weiterentwicklung und Betrieb der geodätischen Raumverfahren VLBI, LLR und SLR erfordern einen erheblichen finanziellen Aufwand. Immer wieder entstehen daher Diskussionen, ob diese Verfahren nicht in Anbetracht des Erfolgs von GNSS (GPS, GLONASS, zukünftig Galileo) auf nur dieses Verfahren reduziert werden könnten. Dabei wird leicht übersehen, dass obige Techniken zu den GNSS komplementäre Stärken besitzen (raumfestes Bezugssystem, UT1, Nutation, Maßstab, Geozentrum, niedrige Koeffizienten des Schwerefeldes, Parameter der Relativitätstheorie, etc.) und das Rückgrat jeder Nutzung von GNSS mit geodätischer Genauigkeit und auch des geplanten globalen Beobachtungssystems bilden. Ihr Wegfall führt zu einer Erosion des heutigen Qualitätsstandards des GPS und der für das globale Beobachtungssystem geforderte Genauigkeitsstandard könnte nicht mehr gehalten werden. Dies muss auch beachtet werden, wenn man das europäische Galileo-System und dessen Potential in den Erdwissenschaften und den Geoinformationsdiensten nutzen möchte. Es ist zu hoffen, dass mit der Realisierung und internationalen Etablierung des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems GGOS eine längerfristige Sicherung des Erhalts dieser unabdingbaren Systeme einhergeht.

Tabelle 1.1: Geodätische Raumverfahren und bestimmbare Parametergruppen

Parameter Typ	VLBI	GPS/ GLON.	DORIS/ PRARE	SLR	LLR	Alti- metrie
Quasar Koord. (ICRF)	X					
Nutation	X	(X)		(X)	X	
Polschwankung	X	X	X	X	X	
UT1	X					
Tageslänge (LOD)		X	X	X	X	
Subtägliche ERPs	X	X				
ERP Ozeangezeiten- Amplituden	X	X		X		X
Koord.+Geschw.(ITRF)	X	X	X	X	X	(X)
Geozentrum		X	X	X		X
Gravitationsfeld		X	X	X	(X)	X
Bahnen		X	X	X	X	X
LEO-Bahnen		X	X	X		X
Ionosphäre	X	X	X			X
Troposphäre	X	X	X			X
Zeit/Freq. Transfer	(X)	X		(X)		

Geometrie
Atmosphäre
Erdrotation
Schwerefeld

## Co-location Sites

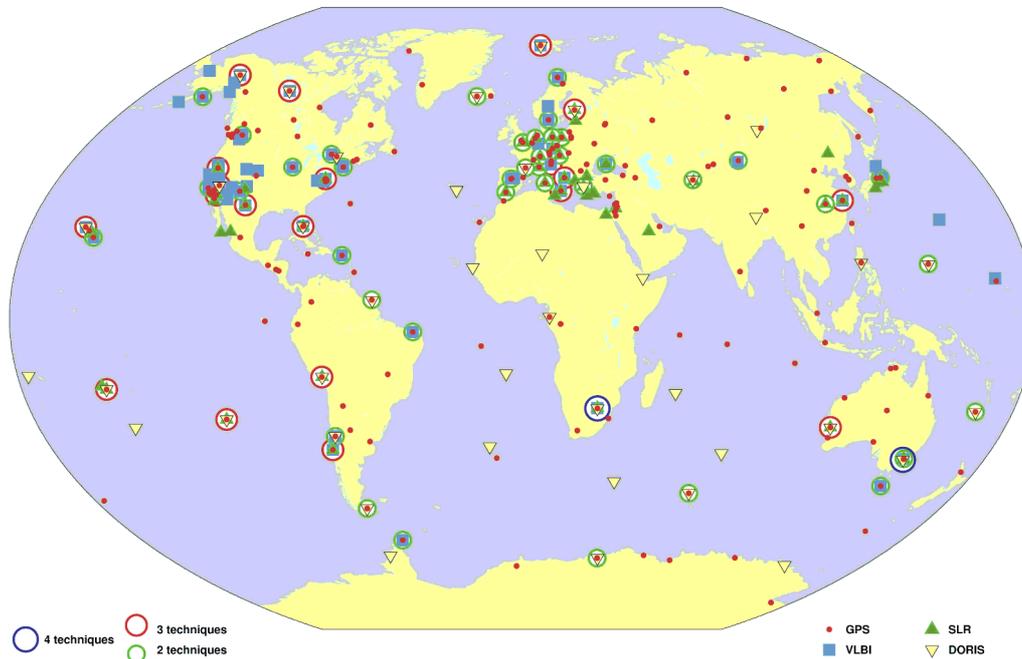


Abbildung 1.1: Globale Stationsverteilung von VLBI, SLR, GPS und DORIS

Die Beobachtungsprogramme jedes der genannten geodätischen Raumverfahren werden aufeinander abgestimmt und in internationaler Zusammenarbeit im Wettbewerb durchgeführt. Die Fundamentalstation Wettzell und TIGO, das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium, das im April 2002 den Messbetrieb in Concepción/Chile aufgenommen hat, gehören zu den führenden Observatorien, auf denen die geodätischen Raumverfahren auf höchstem Genauigkeitsniveau betrieben werden. Ihnen kommt daher bei der Realisierung des Beobachtungssystems zur Datengewinnung eine sehr verantwortungsvolle Aufgabe zu.

Mit Bezug auf die einzelnen Messtechniken ergibt sich für die Fundamentalstationen und GNSS-Stationen der FGS folgendes Bild (detaillierte Berichte finden sich im Abschnitt 2):

**VLBI.**

Mit dem 20m-Radioteleskop in Wettzell sowie mit dem 6m-Radioteleskop von TIGO nimmt die FGS an allen IVS-Beobachtungsprogrammen teil, die sich speziell mit Fragestellungen der Transformation vom raumfesten in das erdfeste Bezugssystem sowie mit der täglichen Bestimmung des (UT1-UTC)-Parameters (durch „INTENSIVE“ Beobachtungsprogramme) auseinandersetzen. Für das Teleskop in Wettzell liegen inzwischen die längsten Zeitreihen aller beteiligten Observatorien vor. Beide Teleskope weisen eine sehr hohe Auslastung auf. Sie sind technologisch auf dem neusten Stand. Wettzell verfügt über einen schnellen INTERNET-Anschluss, über den bereits Daten operationell zum Korrelator weitergeleitet werden, um eine möglichst echtzeitnahe Nutzung der „INTENSIVE“-Daten aufzubauen (e-VLBI).

- Mit einem Korrelator in Bonn beteiligt sich die FGS maßgeblich an der Korrelation der Beobachtungen im Rahmen des IVS. Der Korrelator wird gemeinsam mit dem Max Planck Institut für Radioastronomie, Bonn betrieben, er ist technologisch auf dem aktuellsten Stand.
- Signifikante, für die Internationale Gemeinschaft unverzichtbare Beiträge liefert die FGS mit den Analysezentren am Geodätischen Institut der Universität Bonn, am BKG und am DGFI, sowohl zur operationellen Parameterbestimmung wie auch zur Weiterentwicklung der Auswerteverfahren.
- An der Planung eines neuen Konzepts für VLBI im Rahmen des IVS hat sich die FGS federführend beteiligt. Mit den Vorarbeiten für eine Umsetzung des Vorhabens im Rahmen der FGS wurde begonnen. Die Realisierung wird in der kommenden Begutachtungsperiode stattfinden.
- Die Beobachtungen mit dem Radioteleskop auf O'Higgins/Antarktis wurden weitergeführt. Mit den Möglichkeiten der Digitaltechnik konnte die Station in den letzten Jahren vermehrt in die Beobachtungen eingebunden werden. Mit Arbeiten zur Remote-Steuerung ist begonnen worden. Mit O'Higgins wird ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der globalen Stationsverteilung geliefert.

**SLR/LLR.** Der Messbetrieb mit dem Wettzell Laser Ranging System, WLRS wurde konsolidiert, so dass das System nunmehr quantitativ wie auch qualitativ zur Spitzengruppe der SLR-Systeme zählt. Leider ließ sich aus technischen Gründen der Messbetrieb zu Satelliten nicht mit Messungen zum Mond verbinden.

- Ein neues Laserentfernungsmesssystem ist in der Entwicklungsphase und soll im Jahr 2007 operationell sein. Nach dem neusten Stand der Technik wird es auf zwei Wellenlängen beobachten mit einer Pulsfolge von 1000 Hz. Mit diesem System sollen ausschließlich Satelliten beobachtet werden.
- Nach dem operationellen Betrieb des neuen Systems soll WLRS für hochfliegende Satelliten (z. B. Galileo) und für Entfernungsmessungen zum Mond optimiert werden.
- Das TIGO SLR-Modul hat im April 2002 den Beobachtungsbetrieb aufgenommen. Technische und organisatorische Verbesserungen sind erforderlich, um den Messbetrieb effektiver zu gestalten.

**GNSS.** Über 50 permanent eingerichtete GPS-Stationen, die teilweise auch GLONASS-Satelliten beobachten, betreibt die FGS im globalen, kontinentalen und nationalen Rahmen.

- Im Rahmen eines DFG-Projektes (gemeinsames Vorhaben der FESG mit dem Institut für Planetare Geodäsie der TU Dresden) wird intensiv an einer homogeneren und genaueren Auswertung der Beobachtungsreihen der Stationen des IGS seit 1994 gearbeitet (Steigenberger et al., 2005).

**DORIS.** Ein DORIS-Sender wurde im Mai 2003 in Wettzell installiert. Es ist vorgesehen einen DORIS-Sender in Concepción einzurichten. Problematisch erweisen sich jedoch -Interferenzen im S-Band mit der VLBI.

Das **Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO)**. Im Januar 2002 wurde das neu entwickelte Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO) in Concepción/Chile installiert und im April 2002 erfolgreich in Betrieb genommen. Es ist neben Hartebesthoeck die zweite Fundamentalstation mit VLBI, SLR, GPS und ergänzenden Sensoren auf dem Südhalbrund. Mit dieser

Station wird die globale Stationsverteilung und damit gleichzeitig die Qualität der Realisierung eines erdfesten Bezugsrahmens signifikant verbessert. Die Zusammenarbeit mit den chilenischen Partnern ist gut. Schwierig gestaltet sich die dauerhafte Einbindung von chilenischen Wissenschaftlern in die F&E-Arbeiten der Station. Um eine nachhaltige Zusammenarbeit mit der Universität Concepción zu erreichen, entstand der gemeinsame Plan der Einrichtung einer Geodäsieausbildung. Dieses Vorhaben wird von der Deutschen Geodätischen Kommission unterstützt. Mit finanzieller Hilfe des DAAD wurde 2004 erfolgreich eine geodätische Sommerschule in Concepción abgehalten.

TIGO dient als Kristallisationspunkt in Südamerika; es eröffnet Möglichkeiten, dort wissenschaftliche Programme und Kooperationen zu etablieren, sowie Unterstützung für die internationalen Gemeinschaftsaufgaben in der Geodäsie zu gewinnen.

**Gravimetrische Messungen.** An den Standorten der Fundamentalstationen Wettzell und Concepción werden die Schwerevariationen mit hoher Genauigkeit erfasst. Diese Beobachtungen stehen in engem Zusammenhang mit dem GGOS-Grundgedanken, dass eine enge Verbindung zwischen der Bestimmung der Erdfigur, der Erdrotation und des Gravitationsfelds vorliegt und nur durch die Verknüpfung dieser geodätischen Verfahren eine vollständige Erfassung mit Relativgenauigkeiten von  $10^{-9}$  und besser erreicht werden kann. Die Schwerebeschleunigung spielt nicht nur eine wichtige Rolle bei den grundlegenden metrologischen Definitionen (Ampere, Druck, Masse), sie bildet auch eine wichtige Basis bei der Definition der Höhensysteme. Wegen ihrer Sensitivität gegenüber Höhenänderungen, aber auch wegen ihrer Unabhängigkeit von den geometrischen Referenzsystemen, ermöglicht sie eine eigenständige Kontrolle von Höhenänderungen. Zusätzlich sind die gravimetrischen Messverfahren sensitiv für Massenänderungen nicht nur im Umfeld des Sensors und bilden auf diese Weise Massenverlagerungen im Erdinneren, in der Atmosphäre und der Hydrosphäre ab.

Für genaue terrestrische Schweremessungen in diesem Kontext stehen heute im Wesentlichen zwei gravimetrische Messverfahren zur Verfügung, die kontinuierlichen relativen Schweremessungen der Supraleitenden Gravimeter (SG) an festen Standorten und die Beobachtungen mit den modernen transportablen Absolutgravimetern (AG). Mit den SG werden die zeitlichen Variationen der Schwerebeschleunigung mit Auflösungen von  $0,1 \text{ nm/s}^2$  ermittelt, die in die Entwicklung von Korrekturmodellen eingehen und auch den geometrischen Messverfahren als Parameter für eine deformierbare Erdkruste zur Verfügung stehen. Messungen mit dem AG (Auflösungen  $10 \text{ nm/s}^2$ ) sind erforderlich, um die Langzeitstabilität der kontinuierlichen Schwereaufzeichnungen zu gewährleisten, und sie tragen zur Eichung dieser Messserien bei. Erst durch regelmäßige Wiederholungsmessungen mit dem AG und durch die Verknüpfung mit SG-Daten lässt sich zwischen instrumentellen Nullpunktdriften und säkularen Schwereänderungen unterscheiden. In der Kombination mit den Zeitreihen aus den geometrischen geodätischen Messverfahren (GNSS, Laser, VLBI) können die Zusammenhänge zwischen Änderungen der Bezugssysteme, Umwelteinflüssen und Höhenvariationen aufgedeckt werden.

**Großlaserkreisel.** Die von der FGS in Zusammenarbeit mit dem Department of Physics and Astronomy der University of Canterbury, Neuseeland entwickelten Großlaserkreisel lassen sich (noch) nicht in die Reihe der etablierten geodätischen Messverfahren einreihen. Es

sind Prototypen, mit denen Neuland beschritten wird. Mit Großlaserkreisel lassen sich die inertialen Winkelgeschwindigkeiten von Punkten auf der Erdoberfläche lokal, d.h. ohne Anbindung an ein über Quasare vermarktes, raumfestes System, mit höchster Präzision messen. Im Jahr 2001 wurde der Großlaserkreisel G in einem Tiefenlabor auf der Fundamentalstation Wettzell erfolgreich in Betrieb genommen. Seine Fläche beträgt  $16 \text{ m}^2$ . Es ist der weltweit stabilste und genaueste Laserkreisel. Es ist Ziel dieses Vorhabens, ein zu den geodätischen Raumverfahren unabhängiges Verfahren, d.h. ohne Anbindung an eine extraterrestrische Vermarkung zur Bestimmung der Erdrotationsschwankungen zu entwickeln. Mit diesem Instrument konnten erstmals die so genannten Oppolzer-Terme der Nutation experimentell nachgewiesen werden, (Schreiber et al., 2004). Parallel zu dieser Entwicklung und einem dazu parallel gebauten einfacheren Modell mit einer Fläche von  $370 \text{ m}^2$  (UG1, installiert in Christchurch (NZ)) wurde mit Förderung aus dem Geotechnologienprogramm des BMBF ein so genannter GEO-Sensor realisiert. Er dient der Erfassung des rotatorischen Anteils von Erdbebenwellen. Es ist ein Gemeinschaftsprojekt mit Prof. Igel, Institut für Geophysik / LMU München. Der GEO-Sensor stellt ein neuartiges Messinstrument der Seismologie dar. Der Prototyp wurde vor kurzem auf dem seismischen Observatorium Pinon Flat, Kalifornien/USA installiert. Als weiteres Anwendungsfeld zeichnet sich die Erfassung von z.B. erdbebeninduzierten Torsionsbewegungen in Bauwerken ab.

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

Die Beobachtungsprogramme der global verteilten Stationen werden aufeinander abgestimmt. Hierzu wurde für jedes der geodätischen Beobachtungsverfahren von der IAG ein Dienst eingerichtet: der IVS für die VLBI-Beobachtungen, der ILRS für die Lasermessungen, der IGS für die GPS-Messreihen und der IDS für DORIS. Diese Dienste sammeln die Messreihen der Stationen, verrichten eine Vorprozessierung und Homogenisierung der Daten, berechnen zusätzliche Produkte, archivieren die Messreihen und Produkte und stellen sie für die weitere wissenschaftliche Nutzung zur Verfügung.

Auf der Grundlage der Daten dieser technikspezifischen Dienste erarbeitet der International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) das erdfeste Bezugssystem und dessen Beziehung zum raumfesten Bezugssystem. Der IERS ist ein gemeinsamer Dienst von IAG und der International Astronomical Union (IAU). Alle Herausforderungen, die sich bei der Realisierung eines globalen Bezugssystems auf einem  $10^{-9}$ -Niveau ergeben, laufen im IERS zusammen: Definition und Realisierung von Zeitskalen im Sonnensystem, die Dynamik des Sonne-Mond-Erde-Systems und damit verbunden die konsistente Modellierung des Gezeiteneinflusses, die Rolle der geophysikalischen Fluide und der Dynamik der festen Erde bei der Realisierung eines erdfesten Bezugssystems und vieles mehr. Der IERS wird daher eine herausragende Rolle beim Aufbau des globalen geodätischen Beobachtungssystems einnehmen (Richter 2005).

Die FGS liefert nicht nur routinemäßig die Messreihen der Fundamentalstation an die technikspezifischen Dienste, die Mitglieder der FGS beteiligen sich auch maßgeblich an Ausrichtung, Organisation und Betrieb dieser Einrichtungen, vgl. Kapitel 6. Darüber hinaus setzt sich die FGS für die Schaffung eines IAG-Dienstes für Satellitenaltimetrie ein, um auch für diesen Beobachtungstyp eine international abgestimmte Datenaufbereitung, Modellierung und Archivierung zu erreichen. Von besonderer Bedeutung ist, dass die IAG der FGS gewichtige Aufgaben des IERS anvertraut hat (Analysis Coordination, Zentral-

büro, Back-up-Lösung des vereinbarten terrestrischen Referenz-Systems, Combination Research Centers). Dieses verstärkte Engagement wurde durch ein von FGS und GFZ durchgeführtes Gemeinschaftsprojekt möglich, das im Rahmen des Geotechnologienprogramms des BMBF gefördert wird. Dieses Forschungsvorhaben entwickelte sich in der zurückliegenden Berichtsperiode zu einem zentralen Projekt des FGS-Programms, mit dem Ziel, die Kombination geodätischer Raumverfahren zu verbessern. Dabei will man zum einen eine vollkommen uniforme, hochgenaue Verarbeitung innerhalb jedes Raumverfahrens erreichen, so wie es mit dem bereits genannten „re-processing“ der IGS-Bodenstationen im Rahmen eines DFG-Vorhabens durchgeführt wurde. Zum anderen muss die konsistente, gemeinsame Modellierung und Auswertung unterschiedlicher geodätischer Raumverfahren erreicht werden. Neben dem nur scheinbar trivialen Problem der lokalen Verbindungsmessungen sind Datumsfragen, die unterschiedliche Abtastrate der verschiedenen Raumverfahren und Beeinflussung der Signale durch Refraktion und Gezeiten eine große Herausforderung. Ein dritter Ansatz ist die Kombination von Verfahren im Satelliten, um zu einer besseren Beschreibung von Phasenzentrumsvariationen von Antennen, zeitlich variablen Reflektor- oder Antennenoffsets oder von nicht gravitativen Störeinflüssen auf die Satellitenbewegung zu kommen. Die FGS beteiligt sich mit Vorschlägen (z. B. Lasertransponder auf Satelliten und auf der Mondoberfläche) an dieser Entwicklung.

Innerhalb der kommenden fünf Jahre ist zudem zu erwarten, dass ein dichtes System von hoch fliegenden Navigationssatelliten (GPS, Galileo, GLONASS) über deren Mikrowellensignale verbunden wird mit einem dichten System von niedrig fliegenden Erderkundungssatelliten und mit einem sehr dichten Netz von Bodenstationen. Damit lässt sich eine globale Sondierung von Ionosphäre und Troposphäre erreichen, für erdwissenschaftliche Anwendungen und gleichzeitig für eine konsistente Modellierung aller Atmosphäreneinflüsse auf geodätische Raumverfahren.

Die international abgestimmte Datengewinnung und -auswertung über das von der IAG aufgebaute System der Dienste ist der einzig mögliche Weg, um zu einem globalen Beobachtungssystem für die Erdsystemforschung zu kommen. Es sei jedoch auch erwähnt, dass dieser Ansatz für die auf der Messseite beteiligten Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker einen großen Nachteil mit sich bringt. Mit enormen Erfindergeist und Einsatz werden die Beobachtungsverfahren verfeinert und stets genauere Messreihen generiert, die dann jedoch in der Anonymität der Datenbanken der Dienste untergehen, bevor sie dann von der internationalen geowissenschaftlichen Nutzergemeinschaft für unterschiedliche Anwendungen verarbeitet und publiziert werden. Die Datenproduzenten werden von den wissenschaftlichen Produkten entfremdet. Dies ist ein subjektives Problem für die Betroffenen und ein objektives, da sich ihr Beitrag nicht (ausreichend) mit Publikationen messen lässt.

#### **1.4 Neue Generation Schwerfeldsatellitenmissionen**

Der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der FGS konzentriert sich auf die Realisierung und Erhaltung eines terrestrischen Bezugssystems höchster Präzision. Nur mit einem derartigen System werden die weltweit durchgeführten Positionsmessreihen vergleichbar und lassen sich geophysikalische Phänomene, wie tektonische Bewegungen, Spannungsaufbau, isostatische Ausgleichsbewegungen oder Meeresspiegelveränderungen als Prozesse quantifizieren. Gleichzeitig werden satellitenbasierte Messreihen, wie Ozean-

und Eisaltimetrie oder interferometrisches SAR in einem eindeutigen und in Raum und Zeit reproduzierbaren Koordinationssystem verankert. Schließlich, drittens, ermöglicht die Realisierung eines erdfesten Bezugssystems die genaue und homogene Darstellung der Erdrotationsparameter als Funktion der Zeit. Dies alles sind Grundvoraussetzungen für den Aufbau eines geodätisch-geodynamischen Bezugssystems und gleichzeitig für den operationellen Betrieb von satellitengestützten Ortungs- und Navigationssystemen für die Praxis (GPS und Galileo für öffentliche und kommerzielle Anwendungen).

Eine wesentliche geowissenschaftliche Erweiterung erfährt dieser geometrisch ausgelegte Teil der Satellitengeodäsie durch die Bestimmung des Erdschwerefelds. Es lassen sich dann

- Massenanomalien in Lithosphäre und oberem Erdmantel detektieren (und in Kombination mit geophysikalischen/geologischen Messmethoden detaillierte Modelle der Dynamik des Erdkörpers entwickeln),
- aus Ozeantopographie Massentransporte in den Ozeanen bestimmen (und unter anderem der thermische Beitrag der Meeresspiegelveränderungen von Massenzuwachs separieren) und
- Massenaustausch zwischen Atmosphäre, Ozeanen, Eiskappen und fester Erde bilanzieren (z. B. Veränderungen des globalen Wasserhaushalts).

Mit der neuen Generation von Satellitenmissionen CHAMP, GRACE und GOCE (Start 2006) wird eine neue Qualität der räumlichen und zeitlichen Auflösung und der globalen Konsistenz der Schwerefeldmodelle erreicht. Gleichzeitig erhalten die grossen Bestände terrestrischer Schweremessungen eine neue Bedeutung. Die FGS konnte sich mit Förderung aus dem Geotechnologienprogramm und über Einzelanträge an die DFG an Untersuchungen zu CHAMP (eine Satellitenmission des GFZ) und GRACE (University of Texas in Zusammenarbeit mit GFZ) beteiligen. Gleichzeitig beteiligt sich die FGS über IAPG und FESG maßgeblich an der Vorbereitung der Datenanalyse der ESA-Mission GOCE. Das IAPG koordiniert im Rahmen eines Vertrag mit ESA die Arbeiten eines Konsortiums von 10 europäischen Instituten aus sechs Ländern. Die Arbeiten zu CHAMP und GRACE konzentrierten sich auf die Analyse der Sensorsysteme, auf die Entwicklung eines Verfahrens zur rein kinematischen (geometrischen) Bahnbestimmung aus GPS-Messungen im Satelliten und auf die Berechnung von Schwerefeldmodellen aus diesen kinematischen Bahnen. Die Arbeiten zu GOCE umfassen die gesamte Verarbeitungskette, von der Vorprozessierung, Eichung, Bahnbestimmung, Schwerefeldbestimmung bis zur Qualitätsüberprüfung der Schwerefeldmodelle.

Die Arbeiten zu CHAMP, GRACE und GOCE werden auch für die kommende Programmperiode einen wesentlichen Teil der FGS darstellen.

Eine zusätzliche Dimension werden diese Arbeiten durch die Genehmigung des beantragten DFG-Schwerpunkts „Mass Transport and Mass Distribution in the Earth System“ erfahren, der sich die erdwissenschaftliche Nutzung der geodätischen Messreihen zu Erdfigur und Schwerefeld in Geophysik, Ozeanographie, Hydrologie und Glaziologie zum Ziel setzt.

## 2 Beobachtungsbeiträge der FGS

Mit den modernen Raummessverfahren sind in den letzten drei Jahrzehnten Beobachtungsserien generiert worden, die wesentliche und grundlegende Kenntnisse über die Erde lieferten und weiterhin liefern. Beobachtungsbeiträge werden von fest eingerichteten Observatorien bereitgestellt, die im Rahmen der Dienste strengen Qualitätskriterien unterliegen. Besondere Bedeutung kommen den sogenannten Fundamentalstationen zu. Das sind Stationen auf denen mehrere Raumverfahren gleichzeitig zum Einsatz kommen. Die geometrischen Beziehungen zwischen den Referenzpunkten der einzelnen Raumverfahren, beschrieben durch örtliche Verbindungsvektoren, sind mit höchster Präzision gemessen und bekannt. Fundamentalstationen erlauben es, zum einen die Ergebnisse der verschiedenen Raummessverfahren zu vergleichen, zum anderen die komplementären Eigenschaften der Verfahren zu nutzen. Die Ergebnisse können miteinander kombiniert und unter Ausnutzung der komplementären Eigenschaften verbessert werden, systematische Fehlerquellen der einzelnen Verfahren können aufgedeckt werden.

Die Forschungsgruppe liefert seit mehr als drei Jahrzehnten signifikante Beobachtungsbeiträge zu allen Techniken und stellt sie über die IAG Dienste international zur Verfügung. In den 80er Jahren wurde die Satellitenbeobachtungsstation Wettzell zu einer Fundamentalstation ausgebaut. Die Fundamentalstation Wettzell, die von dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Kooperation mit der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der Technischen Universität München betrieben wird, generiert signifikante Messbeiträge zu allen Raumverfahren. Darüber hinaus werden seit vielen Jahren kontinuierlich Schweremessungen, seismische Messungen und meteorologische Beobachtungen durchgeführt. Sie verfügt des weiteren über ein hochgenaues Zeit- und Frequenzsystem, das die Zeitskala UTC(IFAG) generiert, eine offizielle UTC Zeitskala des Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Eine wesentliche Erweiterung stellt die Installation eines Großringlasers als lokaler Rotationssensor dar, die in den letzten Jahren realisiert werden konnte.

Anfang der 90er Jahre wurde vom BKG gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) die German Antarctic Receiving Station O'Higgins eingerichtet. Im wesentlichen ist dort ein Radioteleskop installiert, mit dem seit 1991 zum einen Fernerkundungsdaten der ERS-Satelliten empfangen werden, die die DLR nutzt, zum anderen geodätische VLBI Beobachtungen durchgeführt werden, die das BKG regelmäßig kampagnenweise ausführt. Darüber hinaus werden GPS/GLONASS Daten und Pegelmessungen aufgezeichnet.

In den 90er Jahren wurde das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO) entwickelt, eine transportable Fundamentalstation, das über alle Raumverfahren verfügt, sowie Schweremessungen, seismische Aufzeichnungen und meteorologische Beobachtungen erlaubt. Ein Zeit- und Frequenzsystem steht ebenfalls zur Verfügung. Es generiert die Zeitskala UTC(TCC), die offiziell im CIRC T des BIPM ausgewiesen ist. TIGO ist seit Januar 2002 in Concepción, Chile, eingesetzt und liefert seit April 2002 Messbeiträge zum IGS, ILRS und IVS. TIGO wird dabei betrieben vom BKG in Zusammenarbeit mit einem chilenischen Konsortium, bestehend aus der Universidad de Concepción (UdeC), die das Konsortium führt, der Universidad del Bio Bio und der Universidad Católica de la Santísima Concepción sowie dem Instituto Geografico Militar /Chile.

Neben den drei geodätischen Observatorien Wettzell, TIGO und O'Higgins werden von der FGS zahlreiche GNSS-Stationen betreut. Sie sind im globalen Netz des IGS, in regionalen Netzen, wie EUREF und SIRGAS, sowie in nationalen Netzen, wie GREF eingebunden.

## 2.1 Die Fundamentalstation Wettzell

Anfang der siebziger Jahre wurde die Station Wettzell zunächst als Satellitenbeobachtungsstation für Laserentfernungsmessung errichtet. Im Rahmen des SFB 78 wurde bereits in den 70er Jahren das Konzept einer Fundamentalstation für Forschungsvorhaben mit vorwiegend geodynamischer Zielsetzung entwickelt, das in den achtziger Jahren im SFB 78 und nach dessen Beendigung in der FGS konsequent umgesetzt wurde. Heute verfügt die Fundamentalstation Wettzell über

- das 20 m-Radioteleskop für VLBI-Beobachtungen,
- das Wettzell Laser Ranging System (WLRS) zur Entfernungsmessung nach künstlichen Erdsatelliten mit der Option zur Mondentfernungsmessung,
- permanent eingerichtete GPS-Stationen, die im Rahmen von IGS, EUREF und GREF (SAPOS) genutzt werden,
- den hochempfindlichen Drehgeschwindigkeitssensor „G“,
- ein Zeitsystem basierend auf 5 Cs-Atomfrequenznormalen, 3 H-Maser und GPS-Zeitempfänger für Zeitvergleiche,
- ein supraleitendes Gravimeter zur Erfassung von Schwereänderungen, dessen Messreihen durch wiederholte absolute Schweremessungen gestützt werden,
- einen Langwellen-Seismographen, der im Rahmen des seismologischen Regionalnetzes genutzt wird,
- geodätische Lage-, Höhen- und Schwerenetze zur Bestimmung lokaler Verbindungsvektoren.

Mit den Messsystemen für VLBI, SLR/LLR und GPS, unterstützt durch lokale Beobachtungen, ist die Fundamentalstation Wettzell (Abb. 2.1)



Abbildung 2.1: Fundamentalstation Wettzell

heute eine besonders herausragende Station für die Realisierung und Laufendhaltung globaler Bezugssysteme. Die Beobachtungen stehen über die internationalen Dienste stets zuverlässig zur Verfügung.

### 2.1.1 Das 20m Radioteleskop für geodätische und astrometrische VLBI

Seit 1983 wird das Radioteleskop Wettzell (RTW) operationell für geodätische VLBI-Beobachtungen eingesetzt. Die regelmäßige Beteiligung an Messungen zur Bestimmung der Erdrotationsparameter und von Krustenbewegungen, sowie gelegentlich an radioastronomischen Beobachtungen, führte zu einer extrem hohen Auslastung des Teleskops. Das Radioteleskop Wettzell spielt daher aufgrund der kontinuierlichen Beteiligung in allen geodätisch-astrometrischen Programmen eine besonders herausragende Rolle. Für das Radioteleskop Wettzell liegen heute die längsten VLBI- Messreihen vor.

#### Stand der Arbeiten

Das Beobachtungsprogramm des Radioteleskops wird vom IVS koordiniert. Abbildung 2.2 zeigt die Auslastung des Teleskops im Jahr 2004 im Vergleich zu den wichtigsten Partnerstationen. Das Radioteleskop Wettzell ist mit 123 Tagen am häufigsten in die 24 Stunden-Sessions des IVS eingebunden. Daneben werden täglich für die Dauer von etwa einer Stunde sogenannte INTENSIVE - Beobachtungen durchgeführt, die zur Ableitung der Rotationsphase der Erde (UT1-UTC) dienen. An den Werktagen wird dazu zusammen mit dem Teleskop Kokee Park /Hawaii, an Samstagen und Sonntagen mit dem Teleskop in Tsukuba/Japan beobachtet.

Das Radioteleskop und seine technischen Einrichtungen sind zur Zeit auf aktuellem Stand. Nach der Implementierung des MK-4 Datenaufzeichnungssystems Anfang 2000 wurde in der Zwischenzeit auch das vom Haystack Observatory des Massachusetts Institute of Technology entwickelte MK-5a System integriert. Das MK-4-System basierte noch auf einer Datenregistrierung mit Magnetbändern, während das MK-5a-System Festplatten nutzt und z.Zt. eine Speicherkapazität von 1,6 TBytes bietet (8 Festplatten mit je 200 GBytes pro Einheit). Mit der Umstellung von Bandaufzeichnungen auf Festplatten ist die Aufzeichnung und Wiedergabe der Beobachtungsdaten erheblich verbessert worden, was wiederum eine wirtschaftlichere Nutzung der Teleskope und der Korrelatoren ermöglichte. Das MK-5a-System erlaubt darüber hinaus, schnelle Internetverbindungen zur Datenübertragung zu nutzen. In Wettzell wurde dazu ein 34Mbps-Anschluss eingerichtet, der es neben Testentwicklungen insbesondere erlaubt, die Daten der INTENSIVE-Messungen elektronisch zum Korrelator zu transferieren.

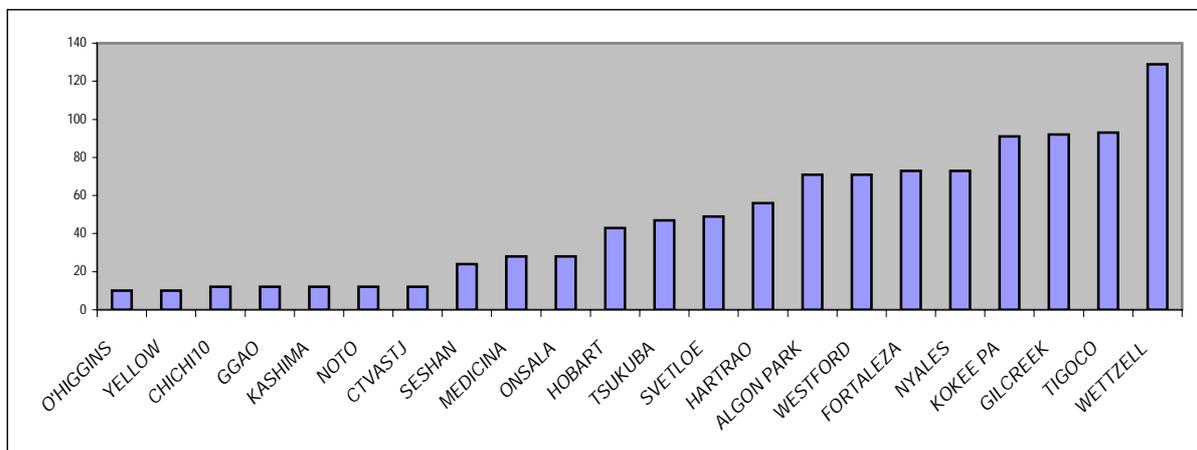


Abbildung 2.2: Anzahl der Beteiligungen an 24h-Beobachtungssessions des IVS im Jahre 2004

Als weitere wichtige technische Fortschritte sind die Erneuerung der Antennen-Kontrolleinheit (ACU) zur Steuerung des 20m Radioteleskops sowie Verbesserungen am Kühlsystem des Empfängers zu nennen.

### **Ziele im Bereich der VLBI Beobachtungen**

Um zukünftig den Betrieb auf einem aktuellen technischen Stand zu sichern, sind neben der Grundwartung weiterhin Systemverbesserungen geplant. Als Nahziele sind zum einen weitere Verbesserungen am Kühlsystems anzustreben, um gute Empfangseigenschaften auch bei extremen Wetterbedingungen im Sommer zu gewährleisten, zum anderen ist das MK-5a-System durch ein weiterentwickeltes Datenaufzeichnungssystem, das MK-5b, zu ersetzen. Durch das MK-5b-System soll die Datenkompatibilität mit anderen digitalen Aufzeichnungstechniken, z. B mit der K5-Entwicklung des National Institute for Communications Technology (Japan), erreicht werden, wozu das sogenannte VLBI Standard Interface zu integrieren ist. Die MK-5-Technologie erlaubt des weiteren, die störanfälligen „Station Units“ des Korrelators zu ersetzen, die für die stationsspezifische Vorprozessierung der VLBI-Datenströme notwendig sind. Diese Entwicklungen werden vom Haystack Observatory weitergeführt und in dem mit MK-5b bezeichneten Datenaufzeichnungssystem verwirklicht sein. Aus Kompatibilitätsgründen mit dem Korrelator wird daher künftig eine Umstellung von MK-5a auf MK-5b erforderlich werden. Die verbesserte Betriebssicherheit durch die digitalen Aufzeichnungssysteme, die bereits integrierte ACU und durch den e-VLBI- Anschluss sind Voraussetzung für die weiterhin geplante Automatisierung des Messablaufes am Radioteleskop Wettzell. Dabei ist die Kapazität des Breitbandanschlusses auf mindestens 1Gbps zu erhöhen.

Im Rahmen des IVS ist zur Koordinierung innerhalb der beteiligten Institutionen ein Vorschlag für die nächste Generation VLBI Technologie (VLBI 2010) erarbeitet worden (Niell et al. 2005). Insbesondere um den künftigen hohen Anforderungen, z.B. im Rahmen des GGOS, gerecht zu werden, sind kontinuierliche Beobachtungen zur Erfassung der Erdrotationsparameter anzustreben. Es ist dabei abzusehen, dass das 20m Radioteleskop den mechanischen Belastungen eines Dauereinsatzes nicht standhalten wird. Als Beitrag der Fundamentalstation Wettzell wird daher als Fernziel die Entwicklung eines neuen VLBI-Beobachtungssystems auf der Grundlage des IVS-Berichts vorgeschlagen. Einer der Vorschläge ist ein System bestehend aus zwei komplett ausgerüstete 12m-Antennen. Damit kann sichergestellt werden, dass kontinuierliche Beobachtungen bereitgestellt werden können, auch wenn ein System repariert oder gewartet werden muss. Eine solche Konfiguration erlaubt außerdem

- die Beteiligung in mehreren Beobachtungsprogrammen,
- die Messung von gleichzeitig zwei Quellen, oder
- die Beobachtung einer Quelle mit schwacher Signalstärke mit zwei Teleskopen gleichzeitig.

Die bisherigen Frequenzbereiche im S- und X-Band müssen aus Kompatibilitätsgründen mit bisherigen Systemen beibehalten werden, sind aber wegen des immer stärker werdenden Einflusses von Störsignalen über den Bereich von 1GHZ bis 15GHZ auszudehnen. Dies ermöglicht eine flexiblere Beobachtungsstrategie und u.a. auch die Beobachtung von Navigationssatelliten (GPS; GLONASS und künftig Galileo), die durch VLBI Messungen in das inertielle Referenzsystem eingebunden werden können. Die Nutzung modernster Datenaufzeichnungssysteme und schneller Datenleitungen (>1Gbps) ist vorzu-

sehen. Der Messvorgang soll vollautomatisch ablaufen. Die Einbindung in das IVS-Programm und der Beobachtungsablauf sollte „on demand“ gemäß den Zielen der Sessionen erfolgen.

Mit dem 20m Radioteleskop sollen dann besondere Beobachtungsprogramme durchgeführt werden, für die größere Antennen notwendig sind. Dies wird, wie im IVS VLBI 2010 vorgesehen, künftig z. B. für Weiterentwicklung und für die Laufendhaltung des International Celestial Reference Frame (ICRF) notwendig werden.

## 2.1.2 Korrelator

Das BKG und das Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) betreiben in Kooperation mit der Universität Bonn den MK-4 / MK-5-Korrelator am MPIfR in Bonn (Abb. 2.3). Weltweit existieren nur drei Korrelatoren der MK-4 / MK-5-Baureihe. Einer der Korrelatoren wird vom USNO in Washington D.C. und ein weiterer vom Haystack Observatory in der Nähe von Boston betrieben.

### Stand der Arbeiten am Korrelator

Bis zu 70 IVS-Beobachtungssessionen werden jährlich in Bonn von einem Team des Geodätischen Instituts der Universität Bonn korreliert. Der Korrelator ist bisher für die Korrelation eines Netzes mit 8 Stationen ausgelegt. Die ursprünglichen 8 Bandstationen (zuzüglich einer Bandmaschine als Reserve) sind heute flexibel mit entsprechenden MK-5a-Einheiten einsetzbar. Da nahezu alle IVS-Beobachtungsstationen nunmehr mit MK-5a-Systemen ausgestattet sind, werden heute bei der Korrelation überwiegend die MK-5a Systeme genutzt. Während bislang für die Korrelation einer 24h-Session mit Bandeinheiten drei bis vier Tage benötigt wurden, dauert eine vergleichbare Korrelation mit den digitalen Festplattensystemen heute nur noch ein bis zwei Tage. Damit konnte die mit dem MPIfR vereinbarte Nutzung des Korrelators in Höhe von 50% für geodätische Korrelationen eingehalten werden, obwohl gleichzeitig die Anzahl der Beobachtungssession erhöht wurde. Die verbleibenden 50% werden vom MPIfR für die Korrelation radioastronomischer Beobachtungen genutzt.

### Ziele und Weiterentwicklung

Die Zuverlässigkeit des MK-4-Korrelators ist derzeit durch die so genannten „station units“ eingeschränkt, die spezifische Informationen jeweils einer Station vorverarbeitet, um bei der Korrelation mit den anderen Beobachtungsstationen hohe Korrelationsgeschwindigkeiten zu erreichen. Diese „station units“ weisen häufig Fehler auf und erfordern Wiederholungen von Korrelationsvorgängen. Eine Weiterentwicklung der MK-5a Datenaufzeichnungssysteme erlaubt es nunmehr, die „station units“ zu umgehen. Vom Haystack Observatory und dem MPIfR werden diese Entwicklungen derzeit vorangetrieben; die ersten Systeme werden in Kürze verfügbar sein. Für den BKG-MPIfR-Korrelator ist in einer gemeinsamen Aktion von BKG und MPIfR vorgesehen, die neuen MK-5b- Systeme zu beschaffen und zu integrieren.



Abbildung 2.3: BKG-MPIfR-Korrelator mit Bandmaschinen, MK-5a-Systemen und den „Station Units“ (über den Bandmaschinen)

Im Rahmen des IVS ist in den nächsten Jahren weiterhin vorgesehen, die Anzahl der Beobachtungssessionen sowie die Anzahl der an einer Session beteiligten Stationen deutlich zu steigern. Als Konsequenz für den Korrelator ergeben sich daraus zwei Hauptforderungen. Die Anzahl der MK-5b-Systeme ist auf 16 zu erhöhen, um die maximale Kapazität des Korrelators voll ausnutzen zu können. Außerdem ist der Korrelator mit einem schnellen Internetanschluss anzubinden, um dem wachsenden Bedarf für die Verarbeitung echtzeitnaher Beobachtungsdaten gerecht zu werden. Langfristig, über den Zeitraum dieses Forschungsprogramms hinaus, ist die Entwicklung eines leistungsstarken Software-Korrelators vorzusehen, da davon auszugehen ist, dass die Korrelation in Echtzeit auf räumlich verteilten Klein-Korrelatoren das effizienteste Verfahren darstellt.

### 2.1.3 Laserentfernungsmessungen

Für stationäre Laserentfernungsmessungen steht das Wettzell Laser Ranging System (WLRS) auf der Fundamentalstation Wettzell zur Verfügung. Um das WLRS im Bereich der Messungen zu Satelliten zu entlasten und verstärkt für Messungen zum Mond und zu hochfliegenden Satelliten (z. B. GPS, GLONASS und Galileo) nutzen zu können, wurde ein neues Laserentfernungsmesssystem, das „Satellite Observing System - Wettzell (SOS-W)“ spezifiziert.

#### Stand des WLRS und des SOS-W

Das WLRS hat 1991 den Routinemessbetrieb übernommen und wird an ca. 350 Tagen im Jahr im 24-Stundeneinsatz betrieben. Die Statistik über die gemessenen Satellitenpassagen im Vergleich zu den anderen ILRS-Beobachtungsstationen ist in der Abbildung 2.4 zusammen gestellt. Mit etwa 6000 Durchgängen im Jahr 2004 ist WLRS ein sehr erfolgreiches System.

In den letzten Jahren sind Maßnahmen zur Konsolidierung des Messbetriebes zu künstlichen Erdsatelliten getroffen worden. Dies sind im wesentlichen die Überarbeitung der Steuerung für das 75 cm Teleskop sowie die Integration eines selbstentwickelten Kontrollsystems, durch das das Gesamtsystem einen hohen Stand an Automatisierung

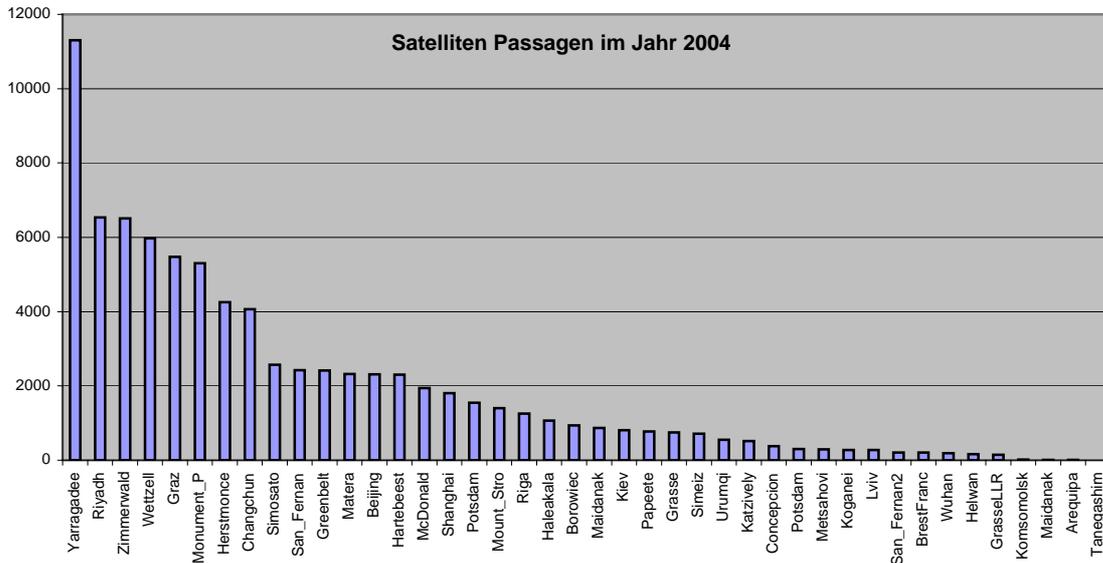


Abbildung 2.4: SLR -Beobachtungsstatistik im Jahr 2004

erfahren hat. Modifikationen am rotierenden Spiegel zur Umschaltung zwischen Aussendung des Laserpulses und Empfang des reflektierten Signals sind durchgeführt worden, um insbesondere auch tieffliegende Satelliten anmessen zu können. Zwischen allen optischen und elektronischen Komponenten ist ein optimaler Abgleich erfolgt, der hinsichtlich Qualität und Quantität sehr effektiv für die Messungen zu Satelliten war. Entfernungsmessungen zum Mond sind zur Zeit nicht möglich, da die Anforderungen zwischen den Messungen zu Satelliten und zum Mond sehr unterschiedlich sind (z.B. in der Laserpulsenergie).

Außerdem wurde ein neuer Event-Timer (Abb. 2.5) entwickelt, der auf der Basis der so genannten Dassault-Module eine interne Laufzeitmessung mit einer Genauigkeit von etwa 2 Picosekunden (ps) erlaubt. Der Event-Timer ist kompatibel mit dem vorhandenen P-PET (portable picosecond event timer). Er erlaubt eine Range-Gate-Steuerung mit einer Genauigkeit von  $\pm 40$  Nanosekunden (ns), um Störpulse auszu-

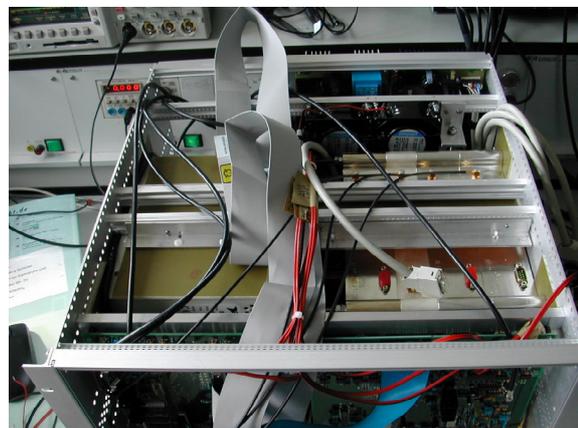
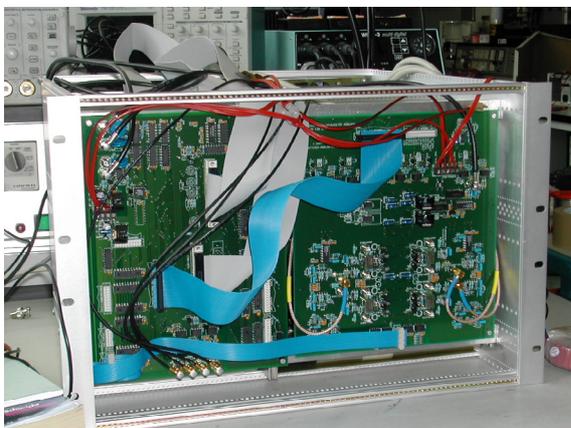


Abbildung 2.5: Event-Timer ET, Steuerplatinen (links), Dassault Module (rechts)

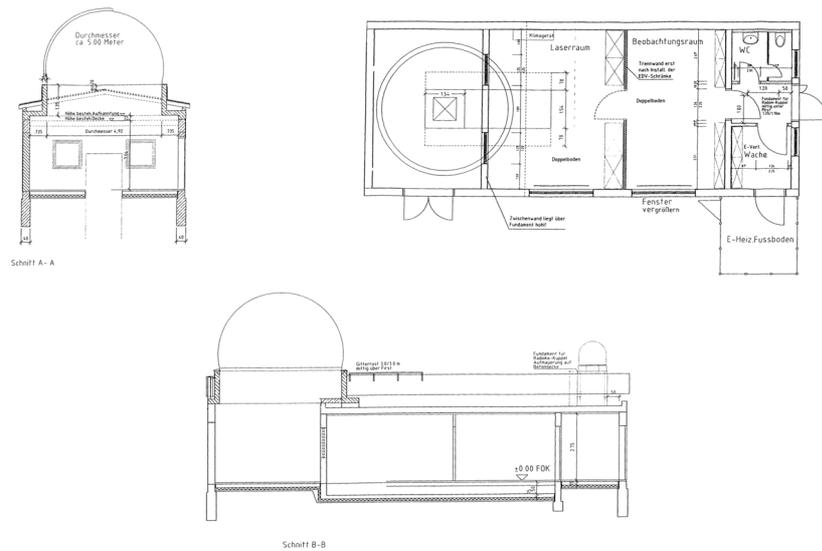


Abbildung 2.6: Planskizzen des SOS-W –Betriebshauses

blenden. Die Genauigkeit des Event-Timers ist mit etwa 10ps ermittelt worden. Das System ist modifizierbar für Pulsfrequenzen bis zu 1KHz und zur Range-Gate-Steuerung bis zu 1ns. Derzeit wird das System im Praxistest am WLRS erprobt, es soll sowohl beim TIGO SLR als auch beim SOS-W zum Einsatz kommen.

Die Kuppel des WLRS, eine modifizierte astronomische Kuppel, ist bedingt durch die schnellen Bewegungen durch die Satellitennachführungen nunmehr nach 15 Jahren verschlissen. Es wird derzeit eine 6m-Kuppel, die insbesondere für schnelle und häufige Bewegungen ausgelegt ist, neu installiert.

Das SOS-W soll im Zeitraum von 2005 bis 2007 auf der Fundamentstation Wettzell installiert werden. Bereits im Lauf des vergangenen Jahres wurden Verhandlungen mit dem staatlichen Hochbauamt geführt, um das Gebäude, das bis vor 15 Jahren das Satellite Ranging System (SRS) der 3. Generation beherbergte, für die Unterbringung des SOS-W zu modifizieren. Im Rahmen der Umbaumaßnahmen soll das SRS-Gebäude mit einer Kuppel versehen und entsprechend renoviert werden. Die Nutzung vorhandener Infrastruktur soll eine möglichst kostengünstige Realisierung ermöglichen. (Abb. 2.6)

Bereits gegen Ende des Jahres 2003 konnten über das Beschaffungamt des Bundesministerium des Inneren die Aufträge zur Fertigung des Lasers und des Teleskops vergeben werden. Der für den Betrieb eines Laserentfernungsmesssystems unerlässliche Event-Timer, das Kontrollsystem sowie große Teile der Detektionshardware werden auf der Grundlage eigener Erfahrungen und Kenntnisse im Hause entwickelt. Bis zum Jahr 2007 soll das SOS-W in Betrieb genommen werden können.

### Ziele und Weiterentwicklung im Bereich Laserentfernungsmessungen

Geodätisch-geodynamische Forschungsvorhaben werden sich auch künftig auf die Nutzung hochgenauer Laserentfernungsmessungen stützen. Neben den zahlreich vorhandenen Satelliten wie LAGEOS-I und II, STARLETTE, STELLA, ETALON-I und II, AJISAI, TOPEX-POSEIDON, ENVISAT, den GPS-SV-35 und 36, den GLONASS- Sa-

telliten, u. a. werden auch künftig weitere Satelliten mit Reflektoren ausgerüstet sein, um ihre Satellitenbahnen mit anderen Meßmethoden oder noch genauer bestimmen zu können. Alle Satelliten des Navigationssystems Galileo werden mit Reflektoren ausgestattet sein, was wegen der großen Entfernung von über 20.000 km leistungsstarke SLR-Systeme voraussetzt. Künftig wird auch die Entfernungsmessung zum Mond wieder an Bedeutung gewinnen, um übergreifende Fragestellungen in den Grenzbereichen der Geodäsie und Astrophysik zu klären (Erde-Mond-System, Raumkrümmung, Veränderung der Gravitationskonstante ...). Des Weiteren sind auch die Refraktionsmodelle zu verbessern. Laserentfernungsmessungen mit zwei oder mehr Wellenlängen werden es erlauben, den Refraktionsanteil der Atmosphäre direkt zu messen.

Bis zur operationellen Inbetriebnahme des SOS-W ist geplant, mit dem WLRS routinemäßig Laserentfernungsmessungen wie im Jahr 2004 durchzuführen. Während der Erprobungsphase des SOS-W sind Parallelmessungen mit WLRS vorgesehen, zum einen um Systematiken zu erfassen, zum anderen um einen kontinuierlichen Übergang zwischen beiden Systemen zu gewährleisten. Sobald ein operationeller Messbetrieb mit SOS-W gesichert ist, werden die Stärken des WLRS für weit entfernte Ziele, wie hochfliegende Satelliten und der Mond, die durch den Routinebetrieb zu allen Satelliten beeinträchtigt waren, wieder voll zur Geltung gebracht werden. WLRS ist sehr leistungsstark und besonders geeignet um Entfernungen hoher Qualität zu ETALON, GPS, GLONASS und Galileo sowie zum Mond zu messen. Es sollen u.a. auch spezielle Mondmissionen, wie der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), dessen Start für 2008 geplant ist, unterstützt werden. Er wird den Mond für ca.1 Jahr umrunden und dabei detaillierte Karten der Mondoberfläche erstellen. Weitere Aspekte beinhalten Messungen des Strahlungsniveaus des Mondes und die Suche nach Eis in Kratern der polaren Regionen, die niemals von der Sonne beleuchtet werden. Bedeutsam ist hier insbesondere das Instrument LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter). Gegenwärtig wird bei der NASA geprüft ob eine Transponderkomponente und SLR-Unterstützung eine entscheidende Verbesserung der Orbitreferenz für die Altimetrie gewährleisten kann. Hard- und Softwareanpassungen sowie eine Überarbeitung der wesentlichen Komponenten wie Teleskop, Laser und Steuerungssoftware sind dafür notwendig.

SOS-W wird ausschließlich zur Beobachtung von Satelliten dienen und dabei insbesondere tieffliegenden Satellitenmissionen wie GRACE und GOCE unterstützen. SOS-W soll 2007 den operationellen Betrieb aufnehmen. Aus den Anforderungen für die niedrigfliegenden Satelliten sowie der geplanten Verwendung eines Lasers mit einer Wiederholrate im Kilohertzbereich resultiert das Konzept eines biaxialen Teleskops. Der Sende- und Empfangsstrahlengang ist getrennt damit eine möglichst hohe Isolation des Empfangsstrahlenganges erreicht wird.

Um systematische Fehler in der Entfernungsmessung weitgehend auszuschließen, werden die Detektoren zeitkorreliert im Einzelphotoelektronenmodus betrieben. Für den Routinebetrieb sind zwei Detektionskanäle sowie ein zusätzlicher Kanal für Systemerweiterungen vorgesehen. Die verschiedenen Detektionskanäle können simultan eingesetzt werden, so dass beispielsweise der zusätzliche Kanal zur photometrischen Spinachsenbestimmung herkömmlicher geodätischer Satelliten genutzt werden kann. Die Spezifikation des Lasers legt besonderen Wert auf die spektrale Reinheit der ca. 40 ps breiten Pulse, wodurch eine sehr hohe Pulstreue erwartet werden kann.

Die kompromisslose Konzeption des Systems zur Unterstützung der 2-Farben-Messung soll weltweit erstmalig eine Refraktionskorrektur auf Millimeterebene ermöglichen, ohne auf Refraktionsmodelle zurückzugreifen. Um diese potenzielle Messgenauigkeit umzusetzen, sind neue Ansätze in der Modellierung systematischer Fehler, insbesondere der Reflektoranordnungen der Satelliten, im Rahmen der bestehenden ILRS-Arbeitsgruppen erforderlich.

Für den autonomen Betrieb des SOS-W werden neue Konzepte bzgl. der Softwaregestaltung erstellt, die zunächst auf eine systemunabhängige Formulierung der Problemlösung abzielen. In Anlehnung an die VLBI-Field-System-Software, welche vorbildlich verschiedenste Hardware der Beobachtungssysteme unter Verwendung des Betriebssystems Linux unterstützt, soll auch durch internationale Beteiligung an der Softwareentwicklung analog ein SLR-Field-System realisiert werden, welches durch entsprechend organisierte Anpassung an jedem SLR-System betrieben werden kann.

#### 2.1.4 Großringlaser „G“

Die Zielsetzung der Großringlaserentwicklung ist, die Rotationschwankungen der Erde im Kurzzeitbereich zu messen. Als lokaler Rotationssensor ist er sehr empfindlich für lokale Rotationen jeglicher Art. Neben der Erfassung der Erdrotation ist der Ringlaser daher auch empfindlich für Rotationen, die durch Erdbeben verursacht werden. Es hat sich dadurch eine weitere Anwendung ergeben, die insbesondere im Geotechnologien-Programm des BMBF mit der Entwicklung des GEOsensors gefördert wurde.

##### Stand der Arbeiten von „G“

Nach einer Bauzeit von 2 Jahren liefert der Großringlaser (Abb. 2.7) seit der Inbetriebnahme im Juli 2001 fast kontinuierlich Erdrotationsdaten. Bedingt durch die auf Stabilität ausgerichtete Konstruktion und dem Betrieb in einer thermisch und mechanisch sehr stabilen Umgebung konnten äußere Einflüsse auf ein unerhebliches Maß reduziert werden. Die jährliche Temperaturvariation in dem unterirdischen Betriebsraum entspricht mit  $\pm 0,25$  °C den Erwartungen. Orientierungsänderungen durch lokale Neigungen und Erdbeben werden mit hochauflösenden Neigungsmessern erfasst. Die Zeitreihen werden in Bezug auf das Gezeitenpotential attraktionskorrigiert und stehen als Orientierungskorrektur der Ringlaser-Zeitserien zur Verfügung. Die Stabilität des Ringlasers konnte in der Zwischenzeit weiter gesteigert werden, so dass seit Mitte 2002 eine maximale Messauflösung, aus-

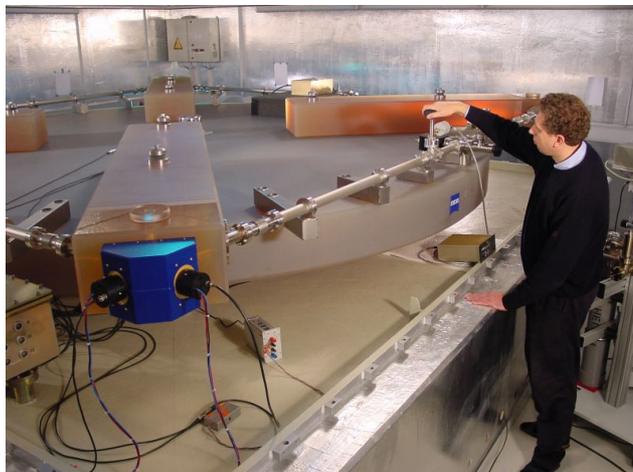


Abbildung 2.7: Großringlaser „G“

Tabelle 2.1: Analyse der Oppolzer Terme einer "G" Zeitreihe über 401 Tage

Astr. argumente							Analyse		Modell
<i>I</i>	<i>I'</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>Q</i>	<i>θ</i>		Amplitude[mas]	rms	Amplitude [mas]
0	0	0	0	0	-1	K1	-7.44	0.14	-8.71
0	0	2	0	2	-1	O1	6.96	0.13	6.87
0	0	2	-2	2	-1	P1	2.40	0.12	3.00
1	0	2	0	2	-1	Q1	1.56	0.12	1.36
0	0	2	0	1	-1		1.39	0.13	1.30
0	0	0	0	1	-1		-1.15	0.14	-1.18
1	0	0	0	0	-1	M1	-0.44	0.11	-0.52
-1	0	0	0	0	-1	J1	-0.40	0.11	-0.50

gedrückt als Allan-Standardabweichung, von  $10^{-8}$  der Erddrehrate nach einer Integrationszeit von 3 Stunden erreicht wird (Abb. 2.8). Damit ist der Ringlaser "G" der weltweit genaueste Rotationssensor. Neben zwei lang integrierenden Verfahren zur präzisen Bestimmung der Sagnac-Frequenz werden seit Ende 2002 zusätzlich zwei schnell abtastende Verfahren eingesetzt, um schnelle Rotationsänderungen, wie sie z.B. beim Durchlauf seismischer Wellen lokal auftreten, zu erfassen.

Mit dem "G" ist es erstmalig gelungen, die tägliche kreisförmige Bewegung der instantanen Rotationsachse ("tägliche Polbewegung" oder "Oppolzer Terme") direkt zu messen. Ausgewählte Zeitreihen mit einer Länge von insgesamt 401 Tagen erlauben es, die acht größten Terme der täglichen Polbewegung mit einem formalen Fehler von weniger als 0,2 mas zu schätzen (Tab. 2.1).

Während zweier lokaler Vermessungskampagnen in den Jahren 2001 und 2004 sind die Lage und die Orientierung des "G" bestimmt worden. Die für die Sagnac-Frequenz entscheidende Größe ist die Orientierung der beiden durch die umlaufenden Laserstrahlen aufgespannten Ebenen. Hierzu wurden die an den Wänden sichtbaren Laserlicht-

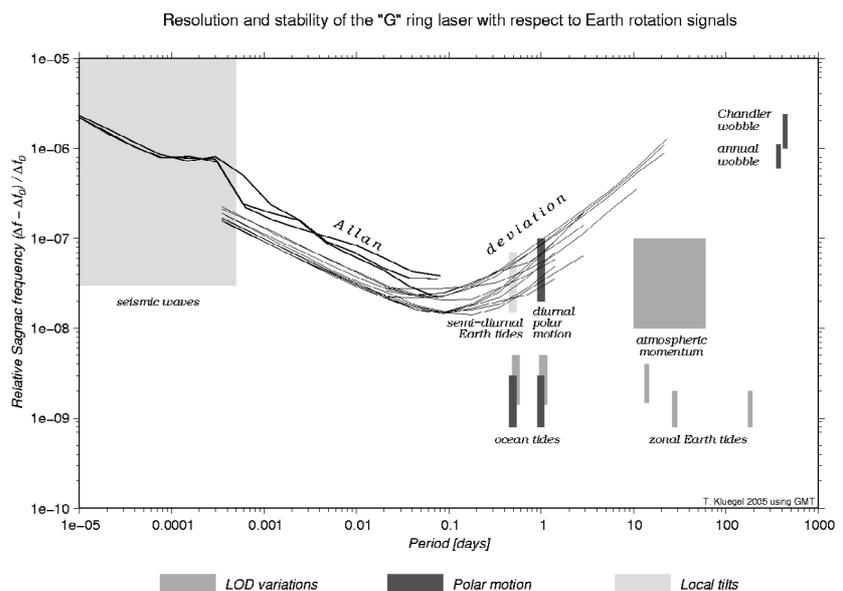


Abbildung 2.8: Auflösung und Stabilität des "G"-Ringlasers.

punkte eingemessen und deren Koordinaten in das lokale Stationsnetz eingebunden. Nachdem mit Hilfe von GPS-Messungen das Stationsnetz in das ITRF2000 überführt wurde, ergeben sich folgende geozentrischen Normalenvektoren  $(x, y, z)$ :

- $(0.6373176, 0.1463624, 0.7565741)$  für den linkslaufenden Strahl und
- $(0.6373677, 0.1464317, 0.7565185)$  für den rechtslaufenden Strahl.

Somit beträgt der Winkel zur Erdrotationsachse  $40.837^\circ$  bzw.  $40.842^\circ$ . Bei einer geschätzten Unsicherheit der Strahlagenbestimmung von  $\pm 0.3$  mm sind die Unterschiede nicht signifikant.

### GEOsensor – Ringlaser für seismische Anwendungen

Ringlaser messen Rotationen absolut. Bei ausreichender Empfindlichkeit des Meßinstrumentes erschließen sich damit auch die Messungen von Rotationen an einem Punkt, welche durch seismische Wellen am Beobachtungsort des Ringlasers hervorgerufen werden. Bisherige Versuche anderer Arbeitsgruppen, neben den Translations- auch Rotationskomponenten von entfernten Erdbeben zu messen, schlugen fehl, weil das verwendete Instrumentarium keine ausreichende Empfindlichkeit aufwies. Im Rahmen des durch das Geotechnologien-Programm geförderten BMBF-Projekts ist ein Sensor entstanden, welcher neben den Translationen teleseismischer Ereignisse auch deren Rotation in einer Ebene erfassen kann (Velikoseltsev 2005). Zentrale Komponente dieses GEOsensors ist ein hochempfindlicher Helium-Neon-Ringlaser. Zusätzliche Sensoren wie Neigungsmesser, Seismometer, Thermometer und eine Anbindung an die UTC-Zeitskala erlauben eine quantitative Analyse der Messungen. Im Januar 2005 wurde der GEOsensor auf dem seismologischen Observatorium Piñon Flat (USA) installiert. Obwohl dieser Sensor nur für den Kurzzeitbereich optimiert ist, stellt er unter günstigen Laborbedingungen einen weiteren unabhängigen lokalen Rotationssensor dar. Abbildung 2.9 zeigt die momentane globale Verteilung der Rotationssensoren an.

Das GEOsensor-Projekt wird gemeinsam von Mitarbeitern der Fundamentalstation Wettzell und der LMU München ausgeführt. Da der GEOsensor primär für die Nutzung als Seismograf für rotatorische Anregungssignale entwickelt wurde, sollte er am Standort des Geodätischen Observatoriums TIGO in Concepción (Chile), einer seismisch sehr aktiven Region nachgerüstet werden und somit zu einem weite-

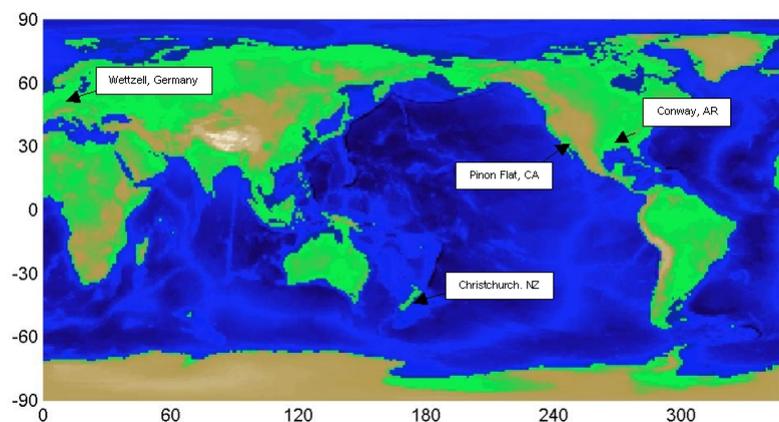


Abbildung 2.9: Globale Verteilung der Rotationssensoren (Geosensoren)

ren Ausbau eines Netzes von Rotationsseismografen beitragen.

### **Ziele und Weiterentwicklungen von Ringlasern**

Gegenwärtig erreicht der G-Ringlaser in Wettzell ein relatives Auflösungsvermögen von  $10^{-8}$  bezüglich der Bestimmung der Erdrotation und ist damit um ca. 5 Größenordnungen genauer als alle bisherigen, kommerziellen Ringlaserrealisierungen. Um Ringlaser an den Genauigkeitsbereich der VLBI anschließen zu lassen, ist eine Steigerung der Sensorempfindlichkeit um eine weitere Größenordnung erforderlich. Neben dem Auflösungsvermögen ist vor allem die Driftrate ein wichtiges Charakterisierungsmerkmal. Hier erreicht der G-Ringlaser einen Wert von  $2 \cdot 10^{-6}$  Grad/Stunde. Obwohl auch dies die Leistungsmerkmale sehr guter kommerzieller Ringlaser um mehrere Größenordnungen übertrifft, besteht an dieser Stelle noch weiterer Entwicklungsbedarf. Geophysikalische Signale im Periodenbereich oberhalb von 1-2 Tagen können derzeit quantitativ nicht sicher erfasst werden. Ursachen für die gegenwärtig noch im System vorhandenen Drifterscheinungen liegen vor allem in der Dynamik der Zusammensetzung der Lasergase. Residuelle Ausgasungen von den Oberflächen des Ringresonators verursachen langsame Änderungen im Verstärkungsfaktor des Lasermediums. Über nichtreziproke Mechanismen ergeben sich damit zeitlich variable und nicht präzisierbare Beiträge zu der Überlagerungsfrequenz des Ringlasers, die sich als unregelmäßige Drift der gemessenen Rotationen äußern. Durch den Einsatz von geeigneten Gettermaterialien und die Modifikation des Vakuumrezipienten soll dieser Einfluss deutlich reduziert werden.

Seit der Inbetriebnahme des G-Ringlasers im Jahr 2001 wurden mehrere lange Zeitreihen von Ringlaserbeobachtungen mit guter Qualität aufgezeichnet. Da Ringlaser eigenständige Sensoren sind, enthalten diese Messungen zusätzliche lokale Einflüsse des Aufstellungsortes. Insbesondere lokale Neigungsänderungen wirken sich stark auf den Verlauf der Zeitreihen aus. Aus diesem Grunde wird auf dem Ringlaser ein Netz von lokalen Tiltmetern zur unabhängigen Bestimmung dieser Neigungseinflüsse betrieben. Durch die Analyse des periodischen Signals der Neigungskomponente der Gezeiten der festen Erde aus den Ringlaser- und Tiltmetermessungen lässt sich die Konsistenz zwischen den Neigungsanteilen des Ringlasersignals und den Tiltmetermessungen herstellen und auf allgemeine Neigungsänderungen der Apparatur anbringen. Dieser letzte Schritt der Verallgemeinerung ist künftig zu leisten. Damit kann dann die Bereitstellung der Ringlasermessungen für die Nutzung im Rahmen des IERS realisiert werden.

Gegenwärtig wird auf der Fundamentalstation Wettzell nur ein Ringlaser betrieben. Damit ergibt sich die grundsätzliche Schwierigkeit bei transienten, nicht periodischen Signalsignaturen zu entscheiden, ob es sich um eine gemessene Winkelgeschwindigkeitsänderung oder um ein instrumentelles Artefakt handelt. Durch Parallelbeobachtungen mit mehreren Ringlasern ließen sich unabhängige Kontrollen der Messungen einführen. Mit dem in den vergangenen Jahren vom BMBF im Rahmen des Geotechnologien-Programms geförderten Entwicklungsprojekt GEOsensor lässt sich auf sehr kostengünstige Weise ein in der Größe skalierbarer Ringlaser realisieren. An günstigen, thermisch stabilen Aufstellungsorten, wie etwa am Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsobservatorium Schiltach oder im Salzbergwerk von Berchtesgaden könnte somit im Kurzzeitbereich von einigen Stunden die erforderliche Messwertredundanz geschaffen werden.



Abbildung 2.10: Supraleitendes Gravimeter SG 29 (links) und Absolutgravimeter FG5-301 (rechts)

### 2.1.5 Gravimetrische Messungen

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 nms<sup>-2</sup> bei einer kontinuierlichen Nullpunktdrift von nicht mehr als 10 bis 20 nms<sup>-2</sup> besitzt. Das Supraleitende Gravimeter misst die zeitlichen Schwereänderungen und ermöglicht genaue Analysen der Erdgezeiten, 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.

Seit 1989 werden die Beobachtungsreihen des Supraleitenden Gravimeters durch absolute Schweremessungen abgestützt. Dies geschah zunächst mit Hilfe anderer Institutionen (US National Geodetic Survey, NGS, Institut für Erdmessung Hannover, IfE). Seit 1993 führt das BKG absolute Schweremessungen mit eigenen FG5-Gravimetern in Wettzell durch. Derzeit erfolgen die Wiederholungsmessungen einem halbjährlichen Turnus. Im Jahre 1998 und 2000 diente die Station Wettzell als Referenzpunkt des UNIGRACE-Projekts<sup>1</sup>, mit dem die Vereinheitlichung der Schwerereferenzsysteme Zentral- und Osteuropas realisiert wurde.

Abb. 2.10 zeigt das im November 1998 in Wettzell installierte Supraleitende Gravimeter SG-29, halbjährliche Absolutgravimeter-Messungen werden mit dem FG5 durchgeführt. Als wichtige Zusatzinformation stehen Messdaten des Grundwasserniveaus auf der Station zur Verfügung. Weitere Verbesserungen werden von kontinuierlichen Aufzeichnungen und Modellierungen der Bodenfeuchte und der Schichtung der Atmosphäre erwartet.

### 2.1.6 Grunddienste, lokale Messsysteme

Der erfolgreiche Einsatz der geodätischen Raumverfahren setzt verschiedene Grunddienste voraus. Zu nennen sind

- die Zeit- und Frequenzhaltung,

<sup>1</sup> [http://www.bkg.bund.de/Geodaesie/g\\_schwere\\_einf.htm](http://www.bkg.bund.de/Geodaesie/g_schwere_einf.htm)

- die Erfassung der meteorologischen Parameter,
- die vermessungstechnischen Überwachungsarbeiten und die Verbindung der Messsysteme.

Darüber hinaus sind weitere in-situ Registrierungen notwendig zur

- Erfassung der Schwere am Ort und deren Veränderungen,
- Erfassung der Seismik.

Die Bereitstellung der Messdaten wird durch einen Rechnerverbund organisiert:

- Die Messdaten müssen an entsprechende Auswertezentren übermittelt werden bzw. müssen zur externen und internen Nutzung über Internet verfügbar vorgehalten werden.

Voraussetzung hierfür ist die Betreuung der Systemrechner und deren Vernetzung. Alle Grunddienste sind im Arbeitsbereich "Allgemeine Dienste" zusammengefasst.

### **Zeit und Frequenzsystem**

Das Zeit- und Frequenzsystem der Station Wettzell umfasst fünf Cäsium-Atomuhren zur Generierung der Zeitskala UTC (Wettzell) und drei H-Maser (Abb. 2.11) für die Bereitstellung hochgenauer Referenzfrequenzen. Eine Anbindung der örtlichen Zeitskala UTC (Wettzell) an die Weltzeitskala UTC geschieht mit zwei GPS-Zeit-Empfängern sowie einem modifizierten geodätischen GPS-Empfänger (ASHTECH-Metronom). Das Zeitsystem der Station leistet seit über 25 Jahren durch Bereitstellung seiner Zeitmessdaten an das BIPM einen aktiven Beitrag zur Generierung der Weltzeitskala UTC.

Als Basisdienst für die Station Wettzell ist geplant, diese Arbeiten künftig fortzusetzen und durch stete Verbesserungen den wachsenden Anforderungen an die Messverfahren selbst anzupassen. Es ist daran gedacht, die Zeitvergleiche mit Hilfe geodätischer GPS-Empfänger zu verbessern und die Phasenmessungen zu nutzen, was jedoch engere Absprachen innerhalb der Zeitlaboratorien voraussetzt. Gemeinsam mit dem DLR und der PTB sind entsprechende Tests vorgesehen. Im Rahmen der neuen VLBI-Beobachtungssysteme (VLBI 2010) ist daran gedacht, einen verbesserten H-Maser, der eine Stabilität bis zu  $10^{-16}$  liefert, zu integrieren.

### **Meteorologische Messungen**

Die meteorologischen Messungen sind erforderlich, um Refraktionskorrekturen für die Messgrößen, die die geodätischen Raumverfahren liefern, zu berechnen. Neben den üblichen Temperatur-, Druck- und Feuchtemessungen werden auch Wasserdampfradiometer eingesetzt, die erlauben, den Feuchteanteil der Atmosphäre und seinen Beitrag zur Refraktion zu messen. Auch hier ist es unabdingbar, diese Messreihen fortzuführen und den künftigen Anforderungen anzupassen. Die Integration eines Sonnenspektrometers in das meteorologische Datensystem wird als eine sinnvolle Ergänzung erachtet. Mit einem Sonnenspektrometer (SSM) läßt sich der Wasserdampfgehalt entlang der Sichtlinie zur Sonne hochgenau bestimmen. Die Methode ist als Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) bekannt und wird seit mehreren Jahren zur Bestimmung von Spurengasen in der Atmosphäre eingesetzt. Seit ca. 5 Jahren werden Instrumente mit hoher spektraler Auflösung eingesetzt, mit denen sich einzelne Absorptionslinien des H<sub>2</sub>O-Moleküls detektieren lassen. In einer Kooperation des Geodäsie- und Geodynamik-Labors (GGL) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) und dem Institut für Spektrochemie und Angewandte Spektroskopie (ISAS) in Berlin wurden zwei



Abbildung 2.11: H-Maser EFOS 18

und Angewandte Spektroskopie (ISAS) in Berlin wurden zwei Prototypen des Geodetic Mobile Solar Spectrometers (GEMOSS) entwickelt, die auf geodätische Anwendungen unter Feldbedingungen zugeschnitten sind. GEMOSS wurde erfolgreich bei Kalibrationsmessungen für Altimetermissionen (ERS-2, ENVISAT) eingesetzt. Anders als bei Mikrowellen-Radiometern, die derzeit zur Bestimmung des Feuchtanteils der troposphärischen Refraktion eingesetzt werden, ist die spektroskopische Messung unabhängig von externer meteorologischer Kalibration (z.B. durch Radiosonden). Trotz der Beschränkung auf direktes Sonnenlicht, das klare Wetterbedingungen voraussetzt, eignet sich ein SSM daher insbesondere für die Absolutkalibration anderer Sensoren, wie z.B. der Wasserdampfadiometer (WVR).

### Örtliche Vermessungsnetze

Der entscheidende Vorteil von Fundamentalstationen ist, dass die Messsysteme durch örtliche Vermessung hochgenau miteinander verbunden werden können. Zu diesem Zweck sind lokale Vermessungsnetze eingerichtet, wie

- ein lokales Netz auf der Station mit einer Ausdehnung von 150 m x 250 m und
- ein Umgebungsnetz (sog. Footprint-Netz) mit einer Ausdehnung von 25 km x 25 km, mit fünf Punkten, auf denen kontinuierlich GPS-Beobachtungen ausgeführt werden.

Das lokale Netz dient der Einmessung der Messsysteme und der Ableitung von Zentrierwerten. Dieses Netz ist wiederholt vermessen worden, woraus eine Positionsgenauigkeit besser als 1mm nachgewiesen werden konnte. Die Orientierung erfolgte durch GPS-Beobachtungen. Die Zentrierwerte liegen im SINEX-Format für weitere Auswertungen vor. Das Umgebungsnetz ist angelegt worden, um evtl. auftretende lokale Veränderungen in Lage und Höhe festzustellen. Kontinuierliche GPS-Beobachtungen erlauben ein direktes Monitoring der Umgebungsstabilität mit einer Genauigkeit von besser als einem Millimeter. Saisonale Systematiken, möglicherweise verursacht durch thermische Ausdehnung, sind nachweisbar (Abb. 2.12). Es ist beabsichtigt, die Netze auch in Zukunft wiederholt zu vermessen, sowie auf ausgewählten Punkten die Netzstabilität durch kontinuierliche GPS-Registrierungen zu überwachen.

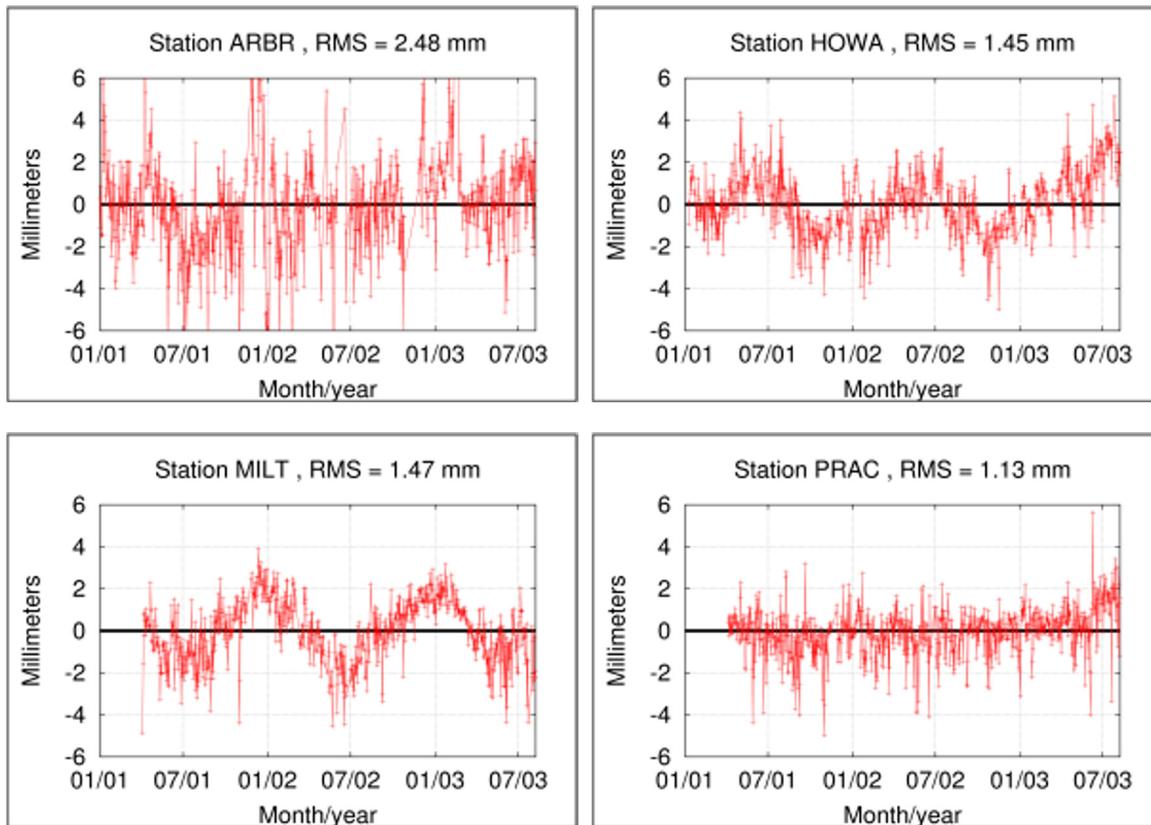


Abbildung 2.12: Variation der Ost-West Komponente von 4 Footprint-Stationen bezogen auf WTZR

### Seismographische Beobachtungen

Seismographische Beobachtungen werden seit über 30 Jahren auf der Station in Zusammenarbeit mit dem Geophysikalischen Observatorium Fürstenfeldbruck der LMU München durchgeführt. Es ist beabsichtigt, diese Messreihe mit dem im Rahmen eines DFG-Projektes beschafften Seismographen fortzuführen.

#### 2.1.7 Fachspezifische Informationstechnologie der Fundamentalstation Wettzell

Ein selbstverständlicher und meist nicht aufgeführter Grunddienst ist die Betreuung der Systemrechner und deren Vernetzung untereinander (LAN) sowie die Anbindung nach außen (WAN). Durch die extrem schnell fortschreitende technische Entwicklung auf diesem Sektor, verbunden mit mangelnder Zuverlässigkeit und unzureichender Unterstützung durch Hersteller und Lieferanten, entwickelt sich diese Arbeit zu einer sehr aufwendigen Tätigkeit.

#### Stand der Informationstechnologie (IT)

Permanente geodätische Messeinrichtungen bilden ein global verteiltes, heterogenes Netz, an das immer höhere Anforderungen bzgl. Übertragungsstabilität zwischen den Stationen und Austauschbarkeit von Daten gestellt werden. Die historisch gewachsenen Systeme stoßen hierbei immer mehr an ihre selbst auferlegten Grenzen. In einer im Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2001-2005 angeregte Projektstudie wurde deshalb die Datenhaltung am Beispiel der Fundamentalstation Wettzell einer grundsätzlichen Untersuchung unterzogen. In einer dreistufigen Realisierung wurden deshalb die Problemfelder in den Datenflüssen identifiziert, schrittweise abstrahiert und Lösungsansätze in Form eines Prototyps realisiert. Grundlegendes Element zur Behebung der existierenden, technischen Heterogenität ist hierbei die Erstellung eines verlässlichen,

ist hierbei die Erstellung eines verlässlichen, transparenten Übertragungsverfahrens auf der Basis der Common Object Request Broker Architecture (CORBA). Dieses konnte erfolgreich an Beispielen im klassischen GPS-Netz getestet werden. Zur Integration heterogener, verschiedenster mehr oder weniger strukturierter Datenformate dient in einer weiteren Stufe eine Transformationsbeschreibung in der eXtensible Markup Language (XML). In einem letzten Schritt werden schließlich informationstechnische Verwaltungseinheiten identifiziert und einer übergeordneten Struktur untergliedert. Diese Bereiche bilden in sich abgeschlossene, nahezu autarke und damit verwaltbare Zonen mit eigenen Recheneinheiten und Datenspeichern. Ergebnis der Arbeit ist das Wettzell Data Management System (WDMS) (Neidhardt 2005). Darin enthalten ist neben einem funktionsfähigen, auf verschiedenen Betriebssystemen lauffähigen Prototyp für die Grundfunktionalität, auch eine Ausarbeitung elementarer Zukunftskonzepte für die Datenhaltung in Wettzell, sowie der Ausgangspunkt für eine Vereinheitlichung von Programmierung und informationstechnischer Strukturierung.

Viele Anwendungen der Fundamentalstation Wettzell sind spezifisch für die Anforderungen der Messstationen. Deshalb ist es notwendig, einen Großteil der Programme spezifisch für die Anforderungen selbst 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. Grundlage dafür ist der Einsatz der „Unified Modelling Language“ (UML). 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 Synergieeffekt 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 sicher gestellt werden.

### **Ziele der IT**

Es lassen sich drei Zielgruppen für die fachspezifische Weiterentwicklung der IT auf der Fundamentalstation Wettzell zusammenfassen:

- a. Datenerfassungssystem für Umweltparameter  
Auf der Fundamentalstation Wettzell besteht die Notwendigkeit eine Reihe von Parametern kontinuierlich zu erfassen, welche über Sensoren registriert und über verschiedene Schnittstellen (z.B. seriell, analog, digital) in den Rechner eingelesen werden können. Die Abtastrate liegt dabei im 10 Hertz Bereich oder niedriger. Als Anwendungsbeispiele können Umweltparameter, wie z.B. Temperaturen in Elektronikschränken, meteorologische Daten (z.B.

Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Niederschlag), genannt werden. Für diese Anwendungen ist auf der Basis der „vereinheitlichten Entwurfs- und Programmierverfahren“ ein System zu konzipieren, welches erlaubt, eine beliebige Anzahl von Parametern zu ermitteln, zu speichern und einer Epoche zuzuweisen. Die Interpretation der Messwerte muss dabei frei wählbar sein. Die Anbindung an ein lokales Netzwerk zur Datenanalyse und –auswertung ist zu integrieren. Dieses System dient z.B. als Basis für eine Neuentwicklung der meteorologischen Stationen von Wettzell, TIGO und O'Higgins, für meteorologische Messwernerfassung an GNSS Systemen oder zur Erfassung diverser Parameter als Grundlage eines automatischen Systems im Rahmen von SOS-W.

b. High Speed INTERNET Connection

Die Fundamentalstation Wettzell ist im Jahre 2005 über eine Glasfaserstrecke der Kapazität von 34 MBit/s über das Wissenschaftsnetz der Bundesrepublik Deutschland (WIN) an das INTERNET angeschlossen. Im Rahmen von e-VLBI ist die Verbindung zu wissenschaftlich genutzten Netzen insbesondere der USA, Japan und Deutschland zur Übermittlung der VLBI Daten nach Möglichkeit in Echtzeit zu entsprechenden Korrelatoren essentiell wichtig. Durch die Anbindung mit einer Kapazität von 34 Mbit/s wurde Wettzell bereits über ein Glasfasernetz an das INTERNET angeschlossen, damit ist aus physikalischer Sicht eine Anbindung von zur Zeit 10 GBit/s möglich. Zur Durchführung der e-VLBI Experimente, welche eine Nutzdatenkapazität von 1 GBit/s aufweisen, wird damit eine Anbindung von mindestens des Eineinhalbfachen der geforderten Nutzkapazität benötigt. Dies bedeutet im Rahmen des Wissenschaftsnetzes eine Anbindung mit 2,4 GBit/s.

c. Kontinuierliche Anpassung der IT-Infrastruktur

Die sich ändernden Anforderungen der Messsysteme an die IT-Infrastruktur bedeuten, dass diese entsprechend angepasst und neu strukturiert werden muss. Damit verbunden ist eine Erhöhung des Durchsatzes des lokalen Netzes. Zur Vermeidung von Störungen echtzeitnaher Anwendungen, wie z.B. der Messsysteme, durch den allgemeinen Netzverkehr auf dem lokalen Netz (LAN) sind Maßnahmen zu treffen, diese externen Einflüsse zu minimieren. Im Zuge einer Umstellung auch der Server-Rechner auf das freie Betriebssystem DEBIAN Linux, welches bereits für Eigenentwicklungen genutzt wird, ist eine Umstrukturierung der Rechnerlandschaft notwendig. Dabei ist besonderes Augenmerk auf die Redundanz der Daten und der Anwendungsprogramme zu legen. Für den Betrieb der Fundamentalstation Wettzell im Hinblick auf eine sichere Datenhaltung und einen ferngesteuerten oder automatisierten Betrieb von Messeinrichtungen gewinnt die Zuverlässigkeit der IT-Infrastruktur eine immer höhere Bedeutung („safety“). Durch geeignete Maßnahmen ist diesen Anforderungen Rechnung zu tragen, u.a. durch Klimatisierung der Rechnerräume, Bereitstellung unterbrechungsfreier Stromversorgungen, doppelte Auslegung zentraler Komponenten, wie z.B. LAN-Switches, Server-Rechner, Ausbau der Datensicherungsmechanismen, der Speichernetze, Festplattenspeicher etc. Des Weiteren werden Sicherheitskonzepte aufgrund zunehmender Gefahren aus der weltweiten Vernetzung immer unerlässlicher („security“). Computer-Viren oder Spamming können zu erheblichen Störungen oder zum vollständigen Ausfall des täglichen Betriebs führen, weshalb geeignete Firewall- und Sperrtechniken als Gegenmaßnahmen einen immer höheren Aufwand bedeuten.

## 2.2 Das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium TIGO

Das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO) wurde im Zeitraum von 1992-1999 in Wettzell entwickelt. Nach einer internationalen Ausschreibung im Juli 1999 wurde von der FGS im Januar 2000 entschieden, TIGO in Concepción, Chile, zu installieren und zu betreiben. Ein gewichtiges Argument für die Installation auf der Südhemisphäre war vor allem die ungleiche Verteilung der Messstationen zwischen Nord- und Südhemisphäre, sowie die in einem „letter of intent“ zugesagte Unterstützung durch die Universität Concepción (UdeC). TIGO ist ein sehr bedeutender Beitrag, um das globale geodätische Referenznetz zu verdichten. In den Jahren 2000 und 2001 wurde ein Notenwechsel zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Republik Chile ausgehandelt, der als chilenisches Dekret seit November 2001 Rechtskraft besitzt und die rechtliche Grundlage für die Kooperation zwischen Deutschland und Chile bildet. Vom chilenischen Partner wurde eine Plattform, ein Anfahrtsweg und geeignete Infrastruktur auf dem Campusgelände der Universidad de Concepción errichtet. Nach Ankunft der TIGO Container im Januar 2002 konnte bereits nach drei Monaten Installationsarbeiten mit den VLBI-Beobachtungen für den IVS, Laserbeobachtungen für den ILRS und GPS/GLONASS-Messungen für den IGS begonnen werden (Abb. 2.13). Seit Dezember 2002 wird der Beitrag des TIGO-Zeitsystems auch beim BIPM zur Generierung der Weltzeitskala UTC anerkannt und die Zeitskala UTC(TCC) zugewiesen. Seit Dezember 2003 ist TIGO ebenfalls im Global Geodynamics Projekt (GGP) mit dem einzigen supra-leitenden Gravimeter in Lateinamerika vertreten.

Die Kollokation von komplementären Sensoren, die Integration neuer Sensoren und die Wartung der bestehenden Instrumente sind gleichermaßen für TIGO und Wettzell erforderlich. Fundamentalstationen leisten insbesondere für das angestrebte IAG-Projekt GGOS unverzichtbare Beiträge. Eine Installation von Empfängern für das geplante europäische Navigationssystem Galileo ist daher von besonderem Interesse.



Abbildung 2.13: TIGO in Concepción / Chile

Die Interessen der chilenische Partner, der Universidad de Concepción (UdeC), der Universidad del Bío Bío (UBB), des Instituto Geográfico Militar (IGM) orientieren sich auch am Nutzen für die akademischen Ausbildung und für eigene Forschungsarbeiten, was über den reinen Messbetrieb hinausgeht. Die Entwicklung und Unterstützung von wissenschaftlichen Aktivitäten, gemeinsam mit der FGS, ist bedeutsam für die nachhaltige und ausgewogene Kooperation. Als sehr positiv haben sich in der Vergangenheit Studienarbeiten und Praktika bei TIGO ausgewirkt, die bislang nur auf Eigeninitiative von Individuen zustanden kamen. Es ist wünschenswert und wichtig, Aktivitäten für und von Promotionsstudenten und Nachwuchswissenschaftlern sowohl aus Chile wie auch aus Deutschland, die in Concepción arbeiten wollen, zu fördern und zu unterstützen. Geodäsie und Geoinformatik befinden sich in Chile in einem Entwicklungsstadium. Die DGK hat ein Angebot zur Hilfe bei der Lehre unterbreitet. Obgleich sich die Forschungsaktivitäten mangels ausreichend verfügbarem qualifiziertem Personal in Chile noch nicht entwickeln konnten, wird TIGO als Katalysator für viele geowissenschaftliche Aktivitäten gesehen. Gleichwohl suchen chilenische Institutionen wie der Hydrografische Dienst der Marine (SHOA), das Nationale Normungsinstitut (INN), der Geowissenschaftliche und Minendienst (SERNAGEOMIN), der regionale Gemeindefrat (ASOMUNI) neben dem Projektpartner IGM kompetente Partner für Kooperationen, die sich über TIGO bilden könnten. Mit diesen Anmerkungen soll angedeutet werden, dass sich viel Forschungs- und Ausbildungspotential in Verbindung mit TIGO nutzen ließe, auch zum Wohle anderer Forschungsvorhaben.

### 2.2.1 TIGO VLBI-Modul

Seit April 2002 liegen geodätischen VLBI Messungen aus Concepción vor. Wie aus der Abbildung 2 erkennbar ist, trägt TIGO nach Wettzell mit den meisten Beobachtungstagen in 2004 zu den VLBI Beobachtungsprogrammen bei. TIGO ist aufgrund seiner Lage auf der Südhemisphäre ein unverzichtbarer Bestandteil des IVS geworden. In 2004 wurde das TIGO-Radioteleskop mit einer neuen Antenna Control Unit ausgestattet, um die Betriebssicherheit in den kommenden Jahren sicherzustellen. An den wöchentlichen VLBI-Messreihen R1 und R4 nehmen TIGO und Wettzell gleichermaßen teil. Somit wird zweimal pro Woche die Basislinie zwischen den Fundamentalstationen Wettzell und Concepción beobachtet. Auf beiden Fundamentalstationen werden, anders als auf reinen VLBI-Stationen, zahlreiche komplementäre Beobachtungen durchgeführt, die als Grundlage für besondere Untersuchungen dienen. So können z. B. die vor Ort durchgeführten H-Maser-Stabilitätsmessungen genutzt werden, um das Uhrenverhalten mit den entsprechenden Ergebnissen des Korrelationsprozesses zu vergleichen und die Modelle zu verbessern. GPS-Phasemessungen, die gleichsam unabhängig Positionen, troposphärische Parameter und Uhrenparameter liefern, können in die VLBI-Analyse einfließen. Da die Zeitkomponente, die Höhe und die troposphärischen Parameter miteinander korreliert sind, können die vor Ort gewonnenen Daten vor allem in Kombination mit VLBI Auswertungen zu Verbesserungen führen.

Technische Entwicklungen zielen auf die Verbesserung des automatischen Messbetriebs hin. Eine wesentliche Komponente ist dabei die Fernüberwachung (Remote Control). Unter Ausnutzung der unterschiedlichen Zeitzonen wird es mit Hilfe der Fernüberwachung möglich, dass Beobachtungsteams, die üblichen Tagesdienst verrichten, VLBI Systeme überwachen, die in Nachtzonen liegen. Im Rahmen des IVS ist die Studie verabschiedet, die Schritte zu einer nächsten VLBI-Generation empfiehlt. Im Zeitraum des Forschungsprogramms

werden die notwendigen Maßnahmen anstehen, um die Anforderungen für das neue System zu erfüllen. Hierzu zählt die Anpassung an die Beobachtungsfrequenzen, wie auch die Integration von digitalen Datenaufzeichnungssystemen (MK-5b), die e-VLBI unterstützen. Es ist absehbar, dass in naher Zukunft die echtzeitnahe Datenübertragung von den Beobachtungsstationen zu den Korrelationszentren realisiert wird und die Verzögerung von der Beobachtung zum Produkt deutlich verringert werden kann und Produkte echt-zeitnahe bereit gestellt werden können. Für den Standort TIGO ergeben sich dabei lokal günstige Voraussetzungen, da ein Glasfaseranschluss an das chilenische Wissenschaftsnetz bereits de facto vorhanden ist. Die derzeit verfügbare Bandbreite ist jedoch noch unzureichend. Dies liegt insbesondere an der Infrastruktur, die von Chile aus interkontinental zur Verfügung gestellt werden kann. Im Zeitraum des Forschungsprogramms sind weitere e-VLB-Tests mit TIGO vorgesehen. Zusammenfassend lassen sich für TIGO-VLBI folgende Forschungs- und Entwicklungsziele formulieren:

### 2.2.2 TIGO SLR- Modul

Das TIGO-SLR-System ist seit seiner Installation, die im April 2002 abgeschlossen wurde, operationell. Aufgrund des Mangels an Personal mit entsprechender Qualifikation wurden die Beobachtungen anfangs nur im Ein-Schicht-Betrieb durchgeführt. Nach Möglichkeit wurden die Beobachtungsperioden so gelegt, dass LAGEOS-Passagen bevorzugt gemessen werden konnten.

Bis Ende 2004 wurden am System folgende Verbesserungen durchgeführt:

- Die anfangs verwendete Avalanche-Diode als Startdetektor erwies sich im Betrieb als unzureichend. Sie wurde durch eine PIN-Diode mit kurzer Anstiegszeit ersetzt.
- Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit wurde ein neues Radar-System installiert.
- Um Beobachtungen bei Tageslicht zu ermöglichen wurde die spektrale Filterung insbesondere im 423nm-Kanal überarbeitet und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis um den Faktor 10 verbessert. Dies ermöglichte ab September 2003 einen Zwei-Schicht-Betrieb.
- Zur Stabilisierung des Oszillators wurde eine Längenregelung integriert.
- Der regenerative Verstärker wurde hinsichtlich der Verbesserung des Kontrastverhältnisses zwischen Vor- und Hauptpuls überarbeitet.

Das TIGO-SLR-System wird konsequent im Einzelphotoelektronmodus betrieben. Dieses gewährleistet den geringsten Eintrag von systematischen Fehlern. Einen Eindruck über die erreichbare Genauigkeit im internationalen Vergleich liefert Abbildung 2.14. Es zeigt die erreichte Standardabweichung der erstellten Normalpunkte respektive des ausgeglichenen Satellitenorbits für alle ILRS-Stationen. Das TIGO-SLR-System behauptet sich dabei in der Spitzengruppe.

Für die nahe Zukunft sind weitere Verbesserungen geplant, wie die Installation eines DPSS-Lasers mit einer Repetitionsrate von 100Hz und die Umrüstung auf ein neues Event-Timing-System, das derzeit an der Fundamentalstation Wettzell entwickelt wird. Ebenso ist beabsichtigt, einen 24-stündigen Beobachtungsbetrieb zu realisieren.

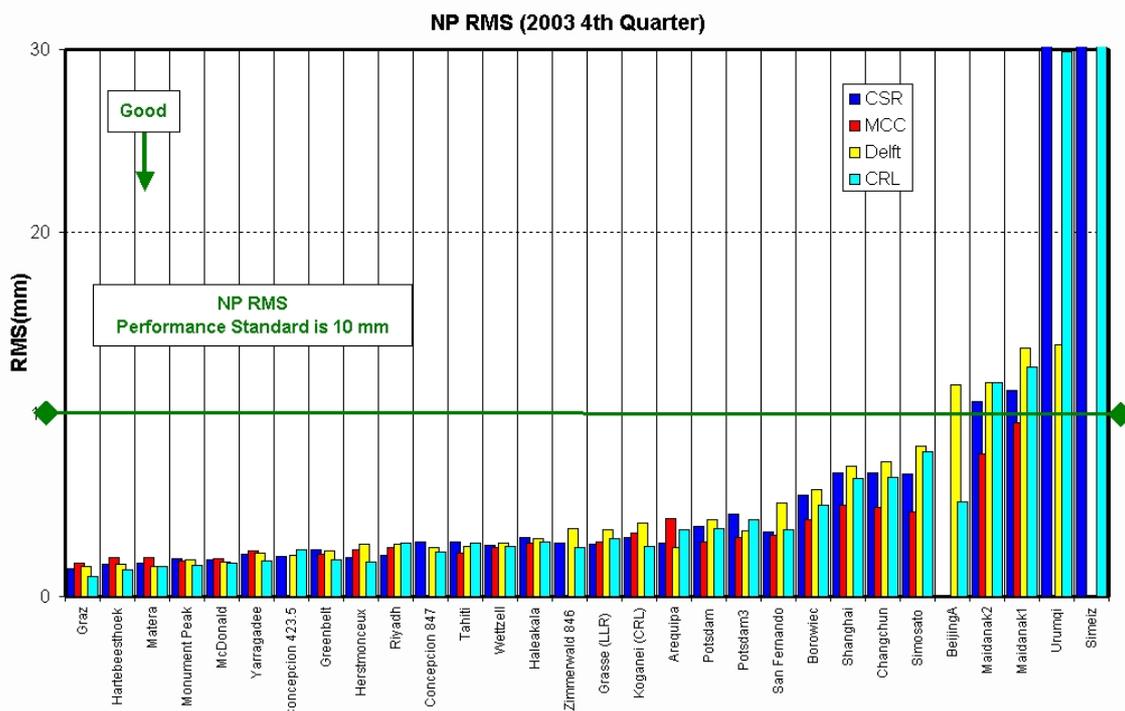


Abbildung 2.14: Standardabweichungen für die Normalpunkte der ILRS Stationen

### 2.2.3 TIGO- Basismodul

Das TIGO-Basismodul umfasst alle Elemente zur Unterstützung der Raumverfahren, wie ein Zeit- und Frequenzsystem, meteorologische Sensoren, lokale Vermessungsnetze und komplementäre Messinstrumente, wie Gravimeter und Seismometer.

#### Zeit & Frequenz

Das Zeit- und Frequenzsystem von TIGO ist derzeit mit zwei H-Masern und drei Cäsium-Standards ausgestattet. Damit stellt es seit 2002 das in Chile best ausgestattete Zeitlabor dar. Obgleich per Gesetz der Hydrografische Dienst der Marine (SHOA) offizieller Repräsentant Chiles beim BIPM ist, ist der Beitrag vom TIGO Zeitsystem zu UTC anerkannt. Seit 2002 liefert TIGO seine Zeithaltungsdaten an das BIPM, unterstützt die Generierung von UTC und hält vor Ort physikalisch die Zeitskala UTC(TCC) vor. Es ist beabsichtigt, dass das SHOA Zeitlabor in Valparaiso maßgeblich durch TIGO als Backup, bedingt durch die Erbebengefährdung, gestützt wird. Dies bedeutet die Durchführung einer permanente Zeitübertragung zwischen den etwa 600km räumlich getrennten Orten. Der inzwischen veraltete TTR-6 GPS-Zeitempfänger wird noch in 2005 durch einen modernen Septentrio für den Zeittransfer auf der Basis von GPS Phasenbeobachtungen ersetzt.

#### Gravimetermessungen

TIGO betreibt das einzige supraleitende Gravimeter in Lateinamerika. Da es sich um ein relatives Messverfahren handelt, sind begleitende Absolutgravimetermessungen durchzuführen. Diese sollten permanent durchgeführt werden, da die geodätischen Raumverfahren einen Hebungsprozess in der Subduktionszone nahe legen. Zur Untersuchung der regionalen Verhältnisse sind des weiteren auch auf Nachbarpunkten Epochenweise absolutgravimetrische Messungen erforderlich. Diese dienen auch für die Definition eines vertikalen Datums

im Rahmen der SIRGAS-Vertical-Projekte. Die vorliegenden Messreihen haben eine noch unerklärte Jahreskurve gezeigt, die vermutlich auf wechselnde Bodenfeuchtigkeit durch ausgeprägte Niederschlags- und Trockenzeiten zurückzuführen sein kann. Zur Validierung dieser Erklärung sind zusätzliche Sensoren wie Bodenfeuchtesensoren und Grundwasserpegel zu installieren und entsprechend auszuwerten.

### **Seismometer- Aufzeichnungen**

Das Seismometer ist Teil des regionalen und nationalen Seismometernetzwerks in Chile. Die Nutzung der Daten wird von chilenischen Geowissenschaftlern vorgenommen. Die Integration in geophysikalische Programme und Monitoringvorhaben, insbesondere im Bereich der Subduktionszone der Nazcaplatte und der südamerikanischen Platte, ist anzustreben.

### **Meteorologische Sensoren**

TIGO unterhält eine Wetterstation mit Sensoren für Temperatur, Feuchte, Druck, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge. Das beige stellte Wasserdampfradiometer misst den Feuchtgehalt der Troposphäre zur Bestimmung des so genannten Zenith Wet Path Delay. Zur Verbesserung der Refraktionsmodelle bei SLR sind diese Sensoren unzureichend. Mit einem komplementären Sonnenspektrometer (SSM) lässt sich der Wasserdampfgehalt entlang der Sichtlinie zur Sonne hochgenau bestimmen. Im Bereich der Mikrowellen wird es hochgenaue, kontinuierliche Messungen des Feuchtanteils der troposphärischen Refraktion liefern, mit denen die Daten des WVR korrigiert bzw. kalibriert werden können. Im Bereich SLR ist die genaue Vermessung der Feinstruktur des atmosphärischen H<sub>2</sub>O-Spektrums im Bereich der Infrarot-Kanals des TIGO-SLR (847 nm) geplant. Dies soll eine genauere Analyse des Refraktionsinflusses von Wasserdampf auf SLR-Messungen ermöglichen. Darüber hinaus lässt sich anhand von Sauerstoff-Absorptionslinien auch der Trockenanteil der atmosphärischen Refraktion entlang der Sichtlinie zur Sonne bestimmen. Der Einsatz eines Sonnenspektrometers ist geplant.

### **Vermessungsarbeiten**

Die lokalen Raumvektoren müssen bekannt sein, sie sind regelmäßig zwischen den Referenzpunkten der geodätischen Raumverfahren zu bestimmen. Eine erste Vermessung wurde Anfang 2004 durchgeführt, die Zentrierwerte liegen gemäß den Anforderungen des IERS im SINEX Format mit mm-Genauigkeit vor. Das regionale Überwachungsnetz von TIGO (Footprintnetz) ist in der Aufbauphase, der Einsatz kalibrierter GNSS-Antennen und Empfänger ist geplant. Eine der GPS-Stationen bindet gleichzeitig eine Pegelstation in das ITRF und in das „SIRGAS Vertical“-Projekt ein.

### 2.3 German Antarctic Receiving Station, GARS-O'Higgins

An der nördlichen Spitze der Antarktischen Halbinsel betreibt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und das BKG mit Unterstützung des chilenischen Instituts für Antarktisforschung seit 1991 die „German Antarctic Receiving Station, GARS-O'Higgins“ (Abb. 2.15).

#### Stand von GARS O'Higgins

Kernelement der Station ist ein 9m Radioteleskop. Das Teleskop dient der DLR als Empfangsstation für Daten der Fernerkundungssatelliten ERS-1 und -2, wie auch für ENVISAT und andere Satelliten sowie dem BKG als geodätische VLBI-Station. Da diese Region auf Grund der Wettersituation keinen ganzjährigen Betrieb erlaubt, werden von beiden Institutionen Beobachtungsteams zur Kampagnenweise Nutzung der Station entsandt. Üblicherweise finden die Einsätze im Antarktischen Frühjahr und Sommer statt, d.h. von Oktober bis Februar hiesiger Jahreszeiten. In diesem Zeitraum wurden bislang jedes Jahr 6 bis 10 vom IVS koordinierte VLBI-Messungen beobachtet. Aufgrund der besonderen Lage ist die Station O'Higgins auch für andere geodätische Beobachtungen sehr attraktiv. Daher hat das BKG dort weitere Messsysteme installiert, die zum großen Teil ganzjährig über Fernkontrolle betrieben werden. Dies sind neben dem Radioteleskop

- 2 GPS/GLONASS Empfänger,
- eine PRARE-Station,
- ein Pegelmesssystem und
- meteorologische Sensoren.

Von der DLR und dem BKG werden als Gemeinschaftseinrichtungen die Infrastruktur genutzt, bestehend aus Strom und Wasserversorgung, Internet- und Kommunikationseinrichtungen. Das BKG hat ein örtliches Vermessungsnetz eingerichtet, mit dem die Verbindungsvektoren zwischen den Messsystemen bestimmt wurden. Durch Wiederholungsmessungen wird die lokale Stabilität der Station nachgewiesen.



Abbildung 2.15: GARS O'Higgins

### **Ziele von GARS O'Higgins**

Die automatisch arbeitenden Systeme bedürfen turnusmäßig einer Wartung, Kontrolle und ggf. Reparatur. VLBI-Messungen werden auch weiterhin durch die periodisch zweimal pro Jahr vor Ort anwesenden Mitarbeiter des BKG durchgeführt, wobei jedes Mal gleichzeitig auch Wartungsarbeiten durchgeführt werden.

Der technische Fortschritt in der Datenaufzeichnung mit den MK-5a bzw. MK-5b-Systemen, sowie die Internetanbindung werden es erlauben, die VLBI-Beobachtungen auch vor und nach den turnusmäßigen Einsätzen durchzuführen. Mit den dazu notwendigen Entwicklungen zur Fernsteuerung des Radioteleskops (remote control) von Wettzell aus ist bereits begonnen worden. Hierzu ist es erforderlich, die vorhandenen Systeme betriebssicherer zu machen. Daher ist u.a. eine neue „Antenna Control Unit (ACU)“ seitens der DLR in Auftrag gegeben worden. Sie wird während des nächsten Einsatzes integriert werden. Im Zuge der Nutzung neuer Fernerkundungssatelliten wird es notwendig, eine schnelle Internetverbindung über Satellit einzurichten. Eine solche Verbindung wird es ermöglichen, auch mit O'Higgins e-VLBI-Beobachtungen durchzuführen.

Aufgrund der besonderen Lage der Station wird es sinnvoll sein, dort auch die Installation eines Galileo-Empfangssystems vorzusehen. Die Kontrolle des örtlichen Bewegungsverhaltens der Station sollte mit Hilfe eines lokalen GNSS-Überwachungsnetzes durchgeführt werden. Allerdings gestaltet sich die Realisierung wegen der ungünstigen Gegebenheiten sehr schwierig.

## 2.4 GNSS-Beobachtungsstationen

Unter dem Begriff Global Navigation Satellite System (GNSS) wird heute die Gesamtheit aller Satellitensysteme verstanden, die primär für die globale Navigation eingerichtet und betrieben werden und auch zur geodätischen Bestimmung von Positionen und Bewegungen eingesetzt werden können. Die modernen Verfahren zeichnen sich durch hohe Genauigkeiten, durch Vielseitigkeit und durch ihre Wirtschaftlichkeit aus, da Beobachtungen weitgehend unabhängig vom Wetter ausgeführt werden können. Seit Abschluss der Ausbauphase, Anfang der 90er Jahre, hat das Global Positioning System (GPS), obwohl es ein militärisches System und damit im zivilen Bereich einigen Einschränkungen unterworfen ist, eine Vielzahl von zivilen Anwendungen. Das von der ehemaligen UdSSR entwickelte Navigationssystem GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) wird mehr und mehr auch zivil genutzt, insbesondere um Anzahl und Geometrie der beobachtbaren Satelliten zu verbessern. Das geplante europäische System Galileo wird eine wichtige Komponente im GNSS werden und insbesondere für zivile Anwendungsbereiche von Nutzen sein. GPS, GLONASS und Galileo werden künftig über 80 Satelliten bereitstellen. In Verbindung mit verbesserte Messmethoden und verfeinerten Auswertetechniken wird es noch bessere Ergebnisse liefern und noch weitere Anwendungen eröffnen, die wissenschaftlichen Fragestellungen neue Dimensionen geben werden.

### Stand der GNSS-Datenerfassung

Die FGS beteiligte sich seit Anbeginn an den Entwicklungen im Bereich der GNSS- Datenerfassung. Seit Ende der 80er Jahre wurden sowohl kampagnenweise GPS-Beobachtungen durchgeführt, um Festpunktfelder zu vermessen, als auch permanent operierende GPS-Stationen entwickelt und eingerichtet. Inzwischen sind auf vielen dieser Stationen Empfänger eingesetzt, die sowohl GPS wie auch GLONASS-Satelliten beobachten.

Permanent installierten Stationen kommt eine herausragende Rolle zu. Sie liefern hochgenaue Zeitreihen, nicht nur Stationskoordinaten sondern auch troposphärische und ionosphärische Parameter, die zahlreiche Forschungsvorhaben benötigen. Heute beteiligt sich die FGS maßgeblich an der Datengewinnung im Rahmen der IAG Dienste und unterhält etwa 50 Stationen. Im globalen Bereich sind Stationen im IGS-Netz (Abb. 2.16), im kontinentalen Bereich im EUREF-Netz (Abb. 2.17) bzw. im SIRGAS-Netz (Südamerika), im nationalen Bereich in GREF (Abb. 2.18) und im regionalen Bereich z. B. im GPSQUAKENET in den Alpen (Abb. 2.19), eingebunden. Echtzeit- und echtzeitnahe Anwendungen gewinnen immer mehr an Bedeutung. Hierzu wurde das Echtzeitnetz GREF-RT eingerichtet, in dem vorwiegend nationale Stationen angeschlossen sind. Die meisten Stationen sind mit meteorologischen Sensoren ausgestattet, damit troposphärische Parameter abgeleitet werden können. Die IGS-Stationen in Küstenbereichen sind, soweit sie an Pegelstationen liegen, in das TIGA-Projekt (Tide GAuge benchmark monitoring project) des IGS eingebunden.

Das in Frankreich entwickelte DORIS-System (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) hat, bedingt durch eine gleichmäßige, globale Verteilung der Beobachtungsstation, auch im Rahmen geodätischer Forschungen an Bedeutung gewonnen. Obwohl die Messgenauigkeit um einen Faktor 3-4 schlechter im Vergleich zu den Raumverfahren VLBI, SLR/LLR und GPS ist, trägt es zur Bestimmung geodätischer Parameter bei. Fünf Satelliten sind der-

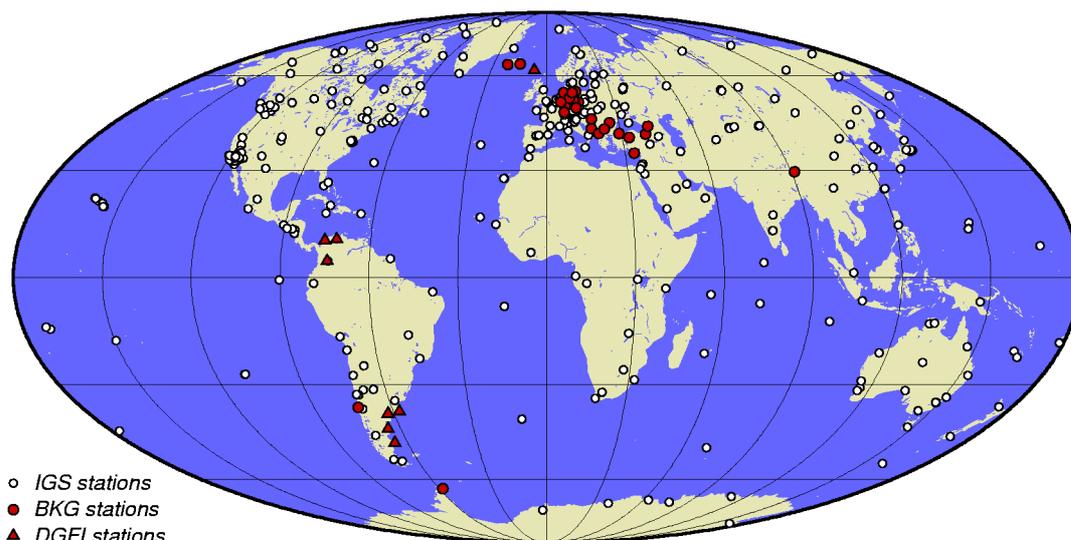


Abbildung 2:16: IGS –Netz, hervorgehoben Stationen der FGS

zeit mit einem DORIS-Onboard-Empfänger ausgerüstet. Der Satellit CRYOSAT wird demnächst noch mit einem Empfänger ausgerüstet werden. Langfristig ist jedoch abzusehen, dass das geplante europäische System Galileo, wie GPS auch, die Funktion von DORIS, nämlich die Bestimmung genauer Satellitenbahnen, übernehmen wird. Ein direkter und zeitnaher Zugriff auf die DORIS-Daten ist aufgrund der Systemkonzeption nicht möglich. Auf der Fundamentalstation Wettzell wurde ein DORIS-Sender in Zusammenarbeit mit dem IGN- Frankreich testweise von Mai bis Oktober 2003 eingesetzt. Danach fiel die Sendestation aus. Bedingt durch Interferenzen mit dem VLBI-Verfahren im S-Band ist der Nutzen der Beobachtungen jedoch umstritten. Während des Einsatzes auf der Fundamentalstation wurde der Sender deshalb nur dann aktiviert, wenn keine VLBI-Beobachtungen stattfanden, um diese qualitativ nicht zu beeinträchtigen. Nachteilig für DORIS wirkt sich auch aus, dass das Onboardsystem nur 4 Bodenstationen gleichzeitig verwalten kann, somit vom Betreiber nur missionsbezogen Bodenstationen angesprochen werden.

Von allen permanent eingerichteten GNSS-Stationen werden stündlich bzw. täglich Daten abgerufen, in das RINEX-Format konvertiert und über die entsprechenden Datenleitungen den Analysezentren zugeleitet. Der Datenfluss ist weitgehend automatisiert. Täglich ist der Datenfluss zu kontrollieren und gegebenenfalls, wenn technische Ausfälle vorliegen, manuell auszuführen. Von den GREF-RT Stationen werden Daten in Echtzeit zu einer Zentrale in Frankfurt übertragen. Die Stationen sind redundant ausgelegt. Sie bedürfen dennoch einer regelmäßigen Wartung (einmal pro Jahr). Aufwendig ist insbesondere, die Stationskomponenten (Rechner, Modems, Betriebssysteme, etc.) der schnellen technologischen Entwicklung anzupassen.

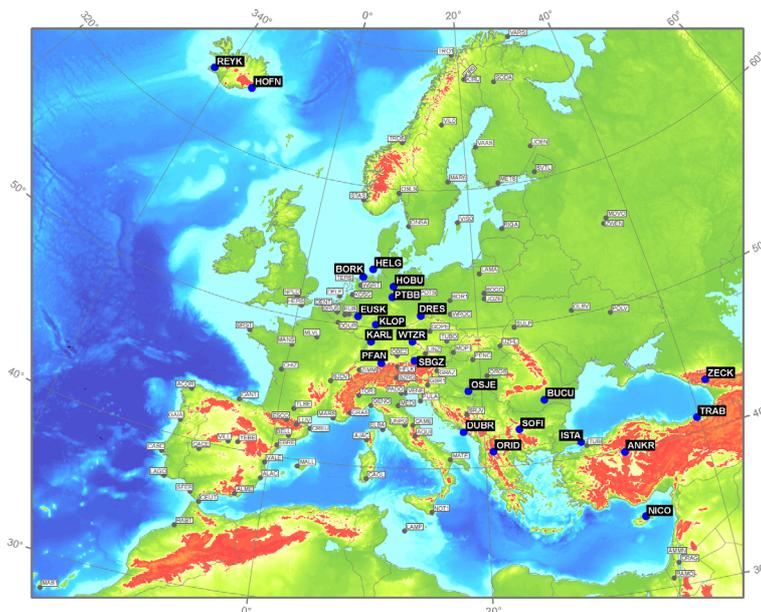
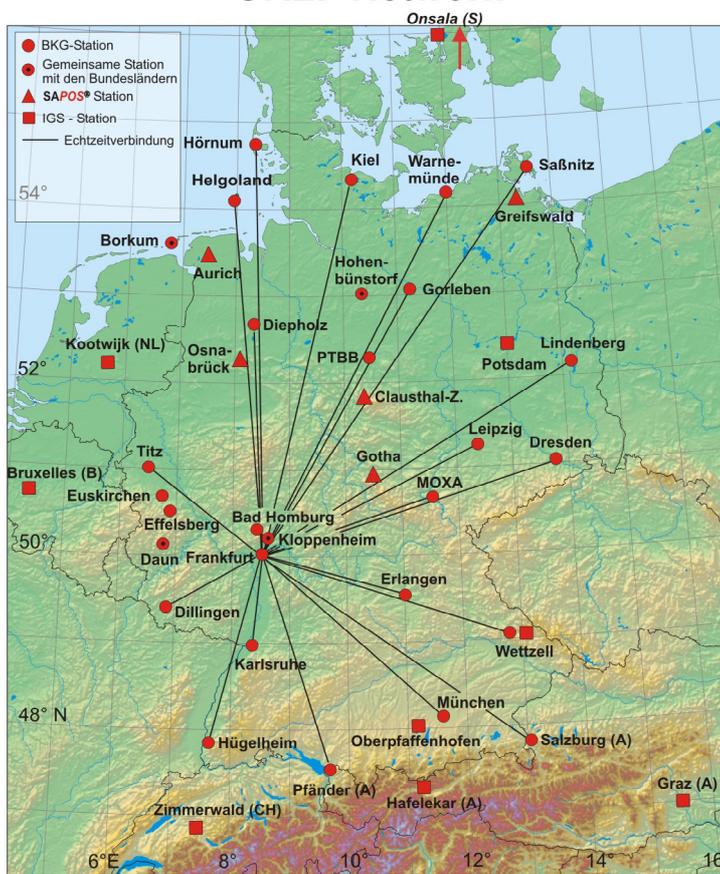


Abbildung 2.17: EUREF- Netz, (blauer Punkt mit schwarzer Beschriftung: Stationen des BKG)

### GRAF Network



© BKG (updated: May 2005)

Abbildung 2.18: GREF-classic und GREF -real time Stationen

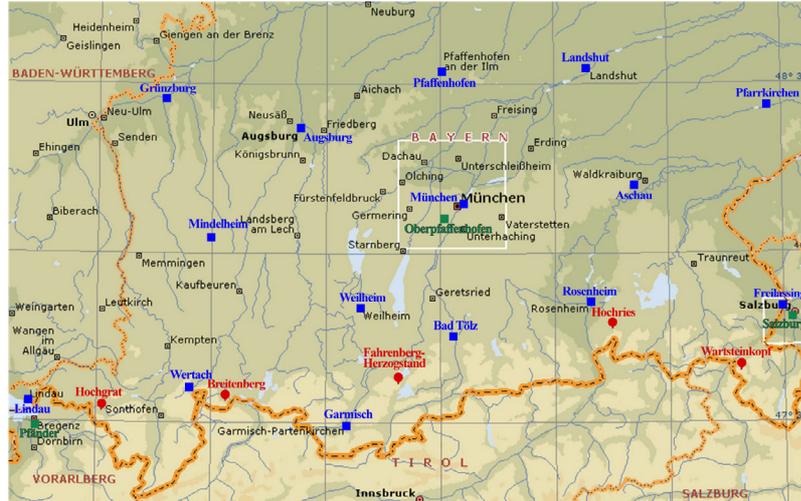


Abbildung 2.19: GPSQUAKENET Stationen (rote Vollkreise: Stationen des DGF1)

### Ziele der GNSS-Messungen

Die GNSS-Datengewinnung ist ein ganz wesentlicher Arbeitsbereich der FGS, der mit großer Sorgfalt kontinuierlich durchgeführt werden muss. Der unterbrechungsfreie Betrieb, die technische Instandhaltung und fortlaufende Verbesserungen sind weiterzuführen, sowohl für die Stationen in den globalen und kontinentalen Netzen als auch für die nationalen und regionalen Stationen. Um Unstetigkeiten in den Zeitreihen zu vermeiden, ist daher ein Komponententausch auf das Notwendigste zu reduzieren und sorgfältig zu dokumentieren.

Unzulänglichkeiten sind zu verbessern, die durch den gegenwärtigen Betrieb zu Tage treten. Eine softwaremäßige und hardwaremäßige Vereinheitlichung der Stationen ist anzustreben. Nachteilig haben sich kommerzielle Steuerprogramme erwiesen, da Support durch Firmen oftmals nur zeitlich beschränkt ist bzw. war. Änderungen in der Hardware oder in den Betriebssystemen, oftmals selbst nur in den Versionen der Betriebssysteme, erwiesen sich als problematisch und verursachten einen unverhältnismäßig hohen Aufwand, um die Stationen weiterzubetreiben. Eigene Entwicklungen und der Austausch von Entwicklungen von Partnerinstitutionen erwiesen sich als besser geeignet. Sie sind flexibler, lassen sich neuen Anforderungen anpassen und sind schließlich auch auf lange Sicht wirtschaftlicher.

Künftig fallen Entwicklungsaufgaben in den Bereichen der softwaremäßigen Steuerung und Fernwartung der Stationen an. Zu nennen sind hier die Bereiche der Datenübertragung über Internet oder über andere Kommunikationskanäle, die stündlich, täglich oder auch in Echtzeit durchzuführen sind. Nicht zu vergessen ist der Aufwand für die Datenverwaltung. Besonderes Augenmerk ist bei den Entwicklungsaufgaben auf robuste Techniken und Komponenten zu legen, um Störungen u. a. auch durch Fremdeingriffe zu vermeiden. Nur solche Hard- und Softwarekomponenten sind einzusetzen, von denen erwartet werden kann, dass sie IT-typische, kommerzielle Mode-Entwicklungen überleben.

Auch in Zukunft werden neue permanente GNSS-Stationen einzurichten sein, um den wissenschaftlichen und technischen Anforderungen gerecht zu werden. Hier sind Forschungsaufgaben für Fragestellungen der Geodynamik aber auch der Parallelmessungen (Kollokationen) mit anderen Messtechniken zu nennen. Besonders im Umfeld von TIGO, das im Bereich einer Subduktionszone liegt, werden weite-

re permanente Stationen einzurichten sein, um die Eigenheiten regionaler Bewegungen aufdecken und untersuchen zu können. Kooperationen z.B. im Rahmen des Geotechnologie-Programms TIPTEQ-Projektes bieten sich an (TIPTEQ: From The Incoming Plate to Mega-Thrust Earth Quake Processes).

Weitere Aufgaben werden in naher Zukunft mit der Inbetriebnahme des Galileo-Systems auf die Permanentstationen zukommen. Testbeobachtungen auf vorhandenen Stationen, insbesondere auf den Fundamentalstationen der FGS sind durchzuführen. Neu entwickelte Empfänger sind einzurichten, zu integrieren und langfristig zu betreiben.

## 2.5 Tabellarische Zusammenfassung der Ziele

### Fundamentalstation Wettzell

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
20m Radioteleskop für geodätische und astrometrische VLBI	effiziente Bereitstellung von VLBI Beobachtungen gemäß Anforderungen des IVS Beobachtungsprogramms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufrüstung MK5a auf MK5b,</li> <li>• schneller Internetanschluss 1Gbps</li> </ul>
20m Radioteleskop für geodätische und astrometrische VLBI	kontinuierliche Messungen im Rahmen der IVS-R-Serie: gemäß VLBI 2010 (Erdrotationsparameter)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einrichtung einer neuen VLBI-Messanlage bestehend aus zwei 12m Radioteleskope (Antennen)</li> <li>• Empfangssystem von 1GHz bis 15 GHz</li> <li>• MK5b Datenaufzeichnung</li> <li>• e-VLBI Anschluss</li> <li>• VLBI-Standard Interface</li> </ul>
20m Radioteleskop für geodätische und astrometrische VLBI	Beteiligung am CRF-Programm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung des 20mRTW an IVS-Anforderungen (VLBI 2010)</li> </ul>
Korrelator	Anpassung des Korrelators an die Anforderungen des IVS- Beobachtungsprogramms (VLBI 2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufrüstung MK-5a auf MK-5b,</li> <li>• Internetanschluss &lt; 1Gbps für e-VLBI (MPIfR)</li> <li>• Erweiterung auf 16 Stationen</li> </ul>
Korrelator	Entwicklung eines Softwarekorrelators	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitarbeit bei Konzepterstellung</li> </ul>
Laserentfernungsmessungen	optimale Nutzung des WLRS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung des Systems auf hochfliegende Satelliten (GPS, Galileo, GLONASS...)</li> <li>• Kollokation mit SOS-W</li> <li>• Aktivierung des Modus zur Entfernungsmessung zum Mond</li> </ul>
Laserentfernungsmessungen	Inbetriebnahme des SOS-W, ein Zweifarbenmesssystem mit 1 KHz-Repetitionsrate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung der Komponenten <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Betriebshaus</li> <li>○ Teleskop</li> <li>○ 1KHz Titan Saphir Laser</li> <li>○ Kontrollsystem</li> <li>○ Event-Timer</li> <li>○ Detektionssystem</li> </ul> </li> <li>• Kollokation mit WLRS</li> <li>• Messbetrieb</li> </ul>
Großringlaser „G“	Steigerung des relativen Auflösungsvermögen um eine Größenordnung auf $10^{-9}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserung der Zusammensetzung der Lasergase durch Modifikation des Vakuumrezipienten</li> <li>• Einsatz verbesserter Spiegel mit höherem Reflexionsgrad</li> </ul>
Großringlaser „G“	Verbesserung Erfassung lokaler Einflüsse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• genauere Erfassung der Neigungsmessungen und weitere örtlicher Parameter</li> <li>• Verbesserung der Modelle zur Korrektur</li> </ul>
Großringlaser „G“	Geosensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erweiterung des Geosensor-netzes durch weitere Stationen</li> </ul>

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Grunddienste, lokale Messsysteme	Verbesserung des Zeit- und Frequenzsystems	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz geodätischer GPS-Empfänger mit Modifikation zur Zeitübertragung</li> <li>Integration eines neuen H-Maser, gemäß den Anforderungen des VLBI 2010</li> </ul>
Grunddienste, lokale Messsysteme	Verbesserung meteorologischer Messungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz verbesserter Radiometer bzw. Sonnenspektrometer</li> </ul>
Grunddienste, lokale Messsysteme	Erfassung lokaler Instabilitäten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weiterführung, gegebenenfalls Erweiterung der Footprint- Beobachtungen</li> <li>Wiederholungsmessungen im lokalen Vermessungsnetz</li> </ul>
Grunddienste, lokale Messsysteme	Ergänzungen der Gravimeterbeobachtungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusätzliche Erfassung der Bodenfeuchte</li> </ul>
Grunddienste, lokale Messsysteme	Anpassung und Verbesserung fachspezifischer IT	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung eines einheitlichen Datenerfassungssystems für Umweltparameter</li> <li>Einrichtung einer Hochgeschwindigkeits- Internet-Anbindung</li> <li>kontinuierliche Anpassung der IT-Infrastruktur</li> </ul>

### Das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium TIGO

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
TIGO VLBI-Modul	effiziente Bereitstellung von VLBI Beobachtungen gemäß Anforderungen des IVS Beobachtungsprogramms	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufrüstung MK5a auf MK5b,</li> <li>Einrichtung einer schnellen Internetanbindung</li> </ul>
TIGO VLBI-Modul	Anpassung an die IVS Anforderungen VLBI2010	<ul style="list-style-type: none"> <li>Upgrade des Empfängers auf die erforderlichen Beobachtungsfrequenzen</li> </ul>
TIGO VLBI-Modul	Entwicklung einer Fernüberwachung zur Ausnutzung des Zeitzonen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung und Ausbau von Remote Control Funktionen</li> </ul>
TIGO VLBI-Modul	Aufbau von Auswertekapazität für VLBI in Concepción	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausbildung von Fachkräften mit dem Partner</li> </ul>
TIGO SLR- Modul	technische Verbesserung des TIGO-SLR Moduls	<ul style="list-style-type: none"> <li>Installation eines DPSS Lasers mit einer Wiederholrate von 100Hz</li> <li>Integration eines neuen Event-timers</li> </ul>
TIGO SLR- Modul	Optimierung des Beobachtungsbetriebs	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausbildung weiterer Beobachter</li> <li>Einführung eines 24stündigen Beobachtungsbetriebs</li> </ul>
TIGO- Basismodul	Verbesserung des Zeit- und Frequenzsystems	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz geodätischer GPS-Empfänger mit Modifikation zur Zeitübertragung</li> <li>Integration eines neuen H-Maser, gemäß den Anforderungen des VLBI 2010</li> </ul>

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
TIGO- Basismodul	Verbesserung meteorologischer Messungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz verbesserter Radiometer bzw. Sonnenspektrometer</li> </ul>
TIGO- Basismodul	Erfassung lokaler Instabilitäten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung von Footprint-Beobachtungen</li> <li>• Wiederholungsmessungen im lokalen Vermessungsnetz</li> </ul>
TIGO- Basismodul	Ergänzungen der Gravimeterbeobachtungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusätzliche Erfassung der Bodenfeuchte</li> </ul>

### German Antarctic Receiving Station, GARS-O'Higgins

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
German Antarctic Receiving Station, GARS-O'Higgins	effiziente Bereitstellung von VLBI Beobachtungen gemäß Anforderungen des IVS Beobachtungsprogramms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufrüstung MK-5a auf MK-5b,</li> <li>• Upgrade der Antennensteuerung (DLR)</li> <li>• ggf. Einrichtung einer Internetanbindung (DLR)</li> </ul>
German Antarctic Receiving Station, GARS-O'Higgins	Anpassung an VLBI2010 Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Upgrade des Empfängers auf die erforderlichen Beobachtungsfrequenzen</li> </ul>

### GNSS-Beobachtungsstationen

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
GNSS-Beobachtungsstationen	Optimierung des Beobachtungsbetriebs und Sicherstellung des Datenflusses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Software und Hardware Vereinheitlichungen</li> <li>• Einsatz robuster Komponenten</li> </ul>
GNSS-Beobachtungsstationen	Durchführung Schwerpunktbezogener Beobachtungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einrichtung weiterer Beobachtungsstationen</li> </ul>
GNSS-Beobachtungsstationen	Einbindung von Galileo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration von Galileo Empfangssystemen auf ausgewählten Stationen</li> </ul>

### 3 Datenaufbereitung und -archivierung

Die FGS bearbeitet ein deutsches Spiegelbild von GGOS mit seinen drei Säulen Geometrie und Kinematik, Erdorientierung und Erdrotation, Schwerefeld und seine zeitlichen Änderungen. Ebenso breit ist die Palette der im Rahmen der FGS erzeugten Daten-, Analyse- und Zeitreihen. Die Archivierung sowie die nutzergerechte Bereitstellung dieser Daten für die interdisziplinäre Weiterverarbeitung stellt hohe Anforderungen an die technologische, methodische und informationstechnische Realisierung, um den Informationsfluss sowie die Integration, Dokumentation und Verfügbarkeit von Daten sicher zu stellen.

Die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Daten der geodätischen Messsensoren ist eine der wichtigsten Kenngrößen für Aktualität und Attraktivität der Analyseergebnisse. Für viele Anwendungen der geodätischen Raumverfahren ist eine Auswertung in Echtzeit, mindestens jedoch in nahezu Echtzeit gefordert. Um diesen Anforderungen nachzukommen, müssen sowohl die Datenübertragungswege als auch die Aufbereitung und Analysemethoden überprüft und gegebenenfalls verbessert werden.

Über standardisierte Schnittstellen auf der Basis der XML-Technologie sollen die Datenreihen der FGS, aus den Bereichen Geometrie, Erdrotation, Gravimetrie und Altimetrie einheitlich erfasst und aufbereitet werden, um in ein übergeordnetes Informations- und Datensystem eingespeist zu werden. Standardisierte Metadaten sollen die Daten erschließen und den Austausch mit internationalen, globalen Datenkatalogen ermöglichen. Daneben sollen die Daten über die Technologie der Webdienste weiteren Nutzern online für eine interaktive Nutzung zur Verfügung gestellt werden. Gleichzeitig sollen Daten und Dienste über Webdienste anderer Anbieter in das System eingebunden werden, um eine interoperable Nutzung verteilter Geodatenbanken zu ermöglichen (Donaubauer, 2004). Dies soll unter Berücksichtigung bereits vorhandener Standards geschehen, da z.B. Altimetrie und Gravimetrie an Vorgaben der ESA gebunden sind. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in den Aufbau und die Laufendhaltung von GGOS einfließen.

#### 3.1 Anforderungen an einen echtzeitnahen Datentransport

##### 3.1.1 Möglichkeiten einer echtzeitnahen VLBI-Korrelation

###### Stand

Das Verfahren der geodätischen und astrometrischen VLBI ist von Natur aus auf einen Prozess zur Korrelation der empfangenen Signalströme angewiesen. Korreliert werden dabei die digitalisierten Muster des elektromagnetischen Rauschens, die von den Quasaren und Galaxien mit jeweils zwei Radioteleskopen auf der Erde gleichzeitig empfangen werden. Da dieser Prozess zur Zeit nur in wenigen Spezialfällen in Echtzeit ablaufen kann, müssen die Beobachtungsdaten zuerst für eine spätere Prozessierung aufgezeichnet werden.

Die Genauigkeit, mit der die Laufzeitverzögerung als primäre Observable der geodätischen VLBI bestimmt werden kann, ist proportional zur korrelierbaren Bandbreite. Routinemäßig sind die Beobachtungen heute auf 128 MHz Bandbreite ausgelegt, so dass die Signalströme mit 256 Mbit/s digitalisiert und mit der entsprechenden Datenrate aufgezeichnet werden müssen. Die in einer Session maximal beobachtbare Bandbreite richtet sich allerdings immer nach der Station, die die niedrigste Kapazität aufweist. In heutiger Zeit werden neu zu installierende Hardware-Komponenten der Empfänger und der nachgeordneten Elektronik für den Empfang von bis zu 512 MHz Bandbreite, d.h. für ein eine Aufzeichnung von einem Gbit/s, ausgelegt. Erste Korrelationen mit dieser Bandbreite

sind bereits experimentell durchgeführt worden und sollen bald zum Standard erhoben werden.

Als Aufzeichnungsmedium dienen heute überwiegend Magnetplatten mit großer Speicherkapazität, die unter der Bezeichnung MK-5-Aufnahmesystem eingeführt wurden. Dieses basiert darauf, dass jeweils 8 konventionelle Computerfestplatten zu einer fest verdrahteten Einheit mit entsprechender Controller-Hardware zusammengefügt werden. Mit Magnetplatten mit einer Speicherkapazität von je 200 GByte lassen sich so 1,6 TeraByte aufzeichnen. Dies reicht zur Zeit für eine Beobachtungssession von ca. 20 Stunden aus, wenn die zur Zeit maximal mögliche Datenrate von 1 GBit/s angesetzt wird (Tab. 3.1).

### Ziele

Speicherkapazität und VLBI-Messgenauigkeit sind eng miteinander verknüpft. Idealerweise möchte man den Himmel oberhalb einer Beobachtungsstation mit schnellen Quellenwechseln möglichst gleichmäßig und vollständig abtasten. Zur Erzielung eines ausreichenden Signal-zu-Rausch-Verhältnisses kann man auf der einen Seite die aufgezeichnete Bandbreite erhöhen und damit auf der anderen Seite die Integrationszeit einer einzelnen Beobachtung verkürzen und schneller eine andere Position am Himmel anfahren. Ein Ziel für die weiteren Entwicklungen muss es daher sein, sich diesen Sachverhalt zunutze zu machen und die Gesamtbandbreite entsprechend der gegebenen Möglichkeiten weiter zu steigern. Dies hat im Übrigen auch Auswirkungen auf die Mindestgröße der einzusetzenden Radioteleskope.

Tabelle 3.1: VLBI-Aufnahmesysteme

Bezeichnung	Speichermedium	max. Aufzeichnungsrate	Kapazität	
MK-1	8-Spur Computerbänder	128 kbit/s	75 MB	seit 1969
MK-2	Videokassetten	4 Mbit/s	2,7 GB	seit 1974
MK-3	dedizierte Bandmaschinen mit Großformatbändern	56 Mbit/s	40 GB	seit 1979
MK-3a	dedizierte Bandmaschinen mit Großformatbändern	112 Mbit/s	480 GB	seit 1989
MK-4	dedizierte Bandmaschinen mit Großformatbändern	1024 Mbit/s	960 GB	seit 1997
MK-5	Magnetplattensysteme	1024 Mbit/s	1600 GB = 1,6 TB	seit 2004

Zur Speicherung und zum Transport der Signalströme mit ständig wachsender Bandbreite haben sich in letzter Zeit verschiedene tiefgreifende Veränderungen in der Datenhaltungstechnologie ergeben. Ein entscheidendes Ziel dabei ist, verstärkt Komponenten des Massenmarktes zum Einsatz zu bringen, damit sowohl die Kapazität und Zuverlässigkeit der Prozessierung gesteigert als auch die Kosten gesenkt werden können. Der Vorteil der Nutzung von Magnetplatten und der modulare Aufbau ist, dass jederzeit eine weitere Kapazitätssteigerung durch einfachen Austausch der Magnetplatten möglich ist und damit eine längerfristige Perspektive für eine weitere Nutzung der Magnetplattentechnologie gegeben ist.

Tabelle 3.2: VLBI-Datentransport und Korrelationsprozess

Bezeichnung	Datentransport Teleskop - Korrelator	Korrelationsprozess
konventionell	Aufzeichnung auf Medium mit konventionellem Versand	Korrelation vom Speichermedium
eTransfer	Aufzeichnung auf Medium, Transport per Kabelverbindung, Zwischenspeicherung auf Medium am Korrelator	Korrelation vom Speichermedium
eVLBI	direkter Transport der Beobachtungen per Kabelverbindung	Echtzeit-Korrelation

Parallel dazu wird heute bereits der nächste Schritt, die direkte elektronische Übertragung der Bitströme zum Korrelator, getestet und weiterentwickelt. Zu unterscheiden sind hier die Echtzeitkorrelation (eVLBI), die einen verzögerungsfreien Datenfluss voraussetzt, und die elektronische Datenübermittlung (eTransfer), bei der die Daten am Zielort vor der Korrelation noch einmal zwischengespeichert werden müssen. Die Fundamentalstation Wettzell verfügt zur Zeit über einen 32 Mbit/s-Anschluss, so dass die Daten einer einstündigen Messung in ca. 5 Stunden zum Korrelator nach Haystack (USA) oder Tsukuba (Japan) übertragen werden können (Tab. 3.2). Auch wenn dies für Sessionen von 24 Stunden Dauer und höhere Aufzeichnungsraten noch nicht ausreicht, so kann der Magnetplattentransport für die UT1-Intensive-Messungen jedoch bald routinemäßig entfallen und ein entscheidender Zeitgewinn erwirtschaftet werden. Dies wird die echtzeitnahe Kombination mit den GPS-Analyseverfahren erlauben, um die Qualität von IERS Bulletin A weiter zu steigern.

Da das Beobachtungs-zu-Datenübertragungs-Verhältnis von 1:5 für das Radioteleskop Wettzell langfristig zu gering ist, muss ein weiteres Ziel die Steigerung der Datenübertragungskapazität mindestens um den Faktor fünf sein. Damit wird dann auch die Übertragung der Beobachtungsdaten von 24-Stunden-Sessionen möglich.

Bei Messungen eines Netzwerks mit mehreren Stationen stößt die gleichzeitige Zusammenführung der Daten dieser Stationen am Korrelator allerdings an eine konstruktive Grenze. Während jede Beobachtungsstation nur über die Übertragungskapazität für einen einzelnen Datenstrom verfügen muss, benötigt man am Korrelator das entsprechende Vielfache, um die Daten mehr oder weniger gleichzeitig empfangen zu können. Da die Korrelatoren sich aber nicht an zentralen Stellen des Hochgeschwindigkeitsnetzes befinden, müsste für die letzte Meile eine entsprechend hohe Übertragungskapazität zur Verfügung gestellt werden. Einen möglichen Ausweg aus dieser kostenintensiven Lösung stellt die Entwicklung von Software-Korrelatoren dar, so dass im Zeitmultiplexing-Verfahren einzelne Segmente an verschiedenen Stellen der Erde korreliert werden könnten. Bei der unvergleichlich schnellen Entwicklung auf dem Gebiet der Personalcomputer ist dann damit zu rechnen, dass auch hier Produkte des Massenmarktes mit nur geringfügigen Zusatzentwicklungs- und Anschaffungskosten die heute gebräuchlichen dedizierten Korrelatoren ablösen. An dieser Stelle kommt dann auch der weiteren Automatisierung der Auswertesoftware, die im Rahmen der FGS betrieben werden soll, eine besondere Bedeutung zu.

Auf der Ebene der Umsetzung der Korrelationskoeffizienten in Laufzeitdifferenzen war man bisher wegen der wirtschaftlich vertretbaren Datenhaltungskapazität und des Datendurchsatzes in den Möglichkeiten eingeschränkt. In der heutigen Zeit kann man allerdings damit beginnen, die Akkumulationsperioden des Kreuzkorrelationsprozesses von bisher zwei bis vier Sekunden auf Bruchteile von Sekunden zu verkürzen. Dies bietet den Vorteil, dass die Interferenzmuster sehr viel feiner abgetastet

den Vorteil, dass die Interferenzmuster sehr viel feiner abgetastet werden können und damit eine Genauigkeitssteigerung erzeugt wird. Im Rahmen der FGS ist insbesondere innerhalb dieses Arbeitsbereiches ein weiterer Forschungsschwerpunkt zu sehen.

### **3.1.2 Verbesserte Datenaufbereitung für Anwendungen im Bereich GPS, SLR und DORIS**

#### **Stand der Forschung**

Zur Wahrnehmung seiner Aufgaben im Rahmen der internationalen Dienste der IAG werden innerhalb der FGS verschiedene Daten- und Archivierungssysteme betrieben. Das DGFI betreibt im ILRS das European Data Centre EDC, eines der beiden globalen Datenzentren neben CDDIS in den USA. Hinzu kommt die Datenhaltung des IGS Regional Network Associate Analysis Centre für SIRGAS (RNAAC-SIR).

Das BKG ist eines der drei globalen IVS Datenzentren und regionales IGS-Datenzentrum für Europa. Beide Institutionen sind auch Datenzentren für EUREF, das BKG ist weiterhin verantwortlich für die Datenhaltung von GREF. Das IGS/EUREF/GREF Datenzentrum des BKG wurde durch den Einsatz von Datenbanksystemen auf die Implementierung moderner Webdienste vorbereitet.

Die Bereitstellung von GPS-Messungen in Echtzeit wird durch die NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) Technik möglich. Neben der Zertifizierung dieses Verfahrens als RTCM-SC104 Standard stehen auch die erforderlichen Server und Client Programme zur Verfügung. Das Verfahren wird zur Übertragung von Datenströmen, die GNSS-Messungen in Echtzeit enthalten, von global verteilten Messstationen eingesetzt.

#### **Ziel**

Um Zeitreihen möglichst echtzeitnah zu prozessieren und bereitzustellen, sind Mechanismen zum schnellen Datentransfer von den Beobachtungsstationen zu den Auswertezentren nötig. Wenngleich die Strukturen durch internationale Absprachen teilweise vorgegeben sind, sollen im Rahmen der FGS Sicherheitswerkzeuge und Backup-Lösungen entwickelt sowie Möglichkeiten zum Erstellen schneller Verbindungswege erarbeitet werden.

Der Zugriff über HTML-Browser auf das IGS/EUREF/GREF Datenzentrum des BKG wird für administrative Arbeiten an der Datenbank benutzt und soll in Zukunft auch für Nutzer aus möglichst vielen Arbeitsbereichen weiterentwickelt werden. Damit wird erreicht, dass die in der FGS gewonnenen Messungen und Arbeitergebnisse nicht nur einem kleinen Fachkreis, sondern einem großen Anwenderkreis verfügbar sind.

Das NTRIP Protokoll und die eingesetzten Hard- und Softwarekomponenten werden kontinuierlich weiterentwickelt. Auch die Anzahl der weltweiten GNSS-Beobachtungsstationen, die Echtzeitdatenströme abgeben, wird weiter erhöht. Damit sind die Voraussetzungen erfüllt, Programme zur Echtzeitanalyse zu entwickeln und neuartige Produkte zu generieren. Diese wiederum können mit der gleichen Transporttechnik dem Nutzer zur Verfügung gestellt werden.

Derzeit werden nur GPS-Messungen echtzeitnah bearbeitet. Bei SLR und DORIS-Messungen ist dies prinzipiell mit geringem Aufwand realisierbar. Die Möglichkeiten eines echtzeitnahen VLBI Betriebs wurden zuvor beschrieben. Bei den Altimeter- und Schwerefeldmissionen sind neue Datenschnittstellen erforderlich, um überhaupt erst einen schnellen Datentransfer zu ermöglichen.

## 3.2 Datenhaltung und Informationsgewinnung

Aufgrund der integrierenden und globalen Arbeitsweise der modernen Geowissenschaften kommt der interdisziplinären und internationalen Kooperation große Bedeutung zu. Die Notwendigkeit eines koordinierten Austauschs von globalen Daten zu einem besseren Verständnis des Systems Erde ist einer der Kernpunkte zweier internationaler Programme, auf der europäischen Seite gefördert durch die europäische Kommission und ESA das „Global Monitoring for Environment and Security (GMES)“ und international durch die Group on Earth Observation (GEO) das „Global Earth Observing System of Systems (GEOSS)“. Um die Ziele von GEO umzusetzen, haben sich bisher mehr als 60 Nationen und über 40 internationale meist wissenschaftliche Organisationen zusammen geschlossen, unter anderem auch der IAG.

### 3.2.1 Erweiterung des IERS Daten- und Informationssystems

#### Stand der Forschung

Im Rahmen des Verbundantrages „Integration der geodätischen Raumverfahren und Aufbau eines Nutzerzentrums im Rahmen des Internationalen Erdrotationsdienstes (IERS)“ innerhalb des Geotechnologienprojektes des BMBF wurde in einem Teilprojekt am BKG ein Nutzer- und Datenzentrum aufgebaut. Dieses erlaubt heute eine sachgerechte Verwaltung aller Daten und Produkte des IERS.

Mittels eines Datenmanagementsystems werden die Daten und Produkte des IERS gesammelt und administriert sowie in ihrer Originalversion archiviert. Das generelle Konzept bei der weiteren Verarbeitung der Daten basiert auf der Verwendung der eXtensible Markup Language (XML) als zentrales Datenformat für den Austausch und die Arbeit mit den Daten. Aus den XML-Daten können wiederum in einfacher Art und Weise verschiedene Ausgabeformate generiert und vom Nutzer weiterverarbeitet werden. Mit XML wurde ein Format gewählt, dass sich aufgrund seiner Offenheit, Plattformunabhängigkeit und freien Verfügbarkeit zu einem weltweit Standard im Bereich des Datenaustausches über das Internet entwickelt hat und die integrierte Nutzung und Kombination heterogener Datenbestände erleichtert bzw. erst ermöglicht.

Innerhalb des sog. Combination Pilot Projects<sup>1</sup> des IERS, das eine wichtige Rolle im Hinblick auf den Aufbau eines weltweit gültigen Bezugssystems zur Integration geodätischer Raumverfahren (bzw. auf die Realisierung eines globalen geodätisch-geodynamischen Beobachtungssystems) spielt, wird das IERS Datenzentrum operationell eingesetzt, um die benötigten Input- und Output-Datensätze der beteiligten wissenschaftlichen Institutionen auf einem zentralen Server zur Verfügung zu stellen und den Informationsfluss sowie die Integration, Dokumentation und Verfügbarkeit der Daten sicher zu stellen.

Bei der Umwandlung von SINEX-Dateien in das XML-Format kommen die Vorteile der XML-Technologie besonders zur Geltung. So konnten beim Validieren der XML-Dateien mit Hilfe frei verfügbarer Parser sowohl generelle Inkonsistenzen technikspezifischer SINEX-Dateien als auch individuelle Formatverstöße in den einzelnen Dateien aufgedeckt werden, die bei der weiteren Verarbeitung zu Fehlern führen könnten oder zumindest Probleme bereitet hätten.

#### Ziel

Bei der Generierung der konsistenten geodätisch-geophysikalischen Datenreihen sind hohe Anforderungen an die technologische, methodische und informationstechnische Realisierung zu stellen, um als zentrale Schnittstelle zwischen einem hochkomplizierten System von Mess- und Auswerteprozeduren den Informationsfluss sowie die Integration, Doku-

<sup>1</sup> <http://www.iers.org/iers/about/wg/wg3/cpp.html>

mentation und Verfügbarkeit von Daten sicherzustellen. Über standardisierte Technologien und Schnittstellen sollen die im Rahmen der FGS erzeugten Datenreihen weltweiten Datenkatalogen verfügbar gemacht werden. Die von den FGS Analysezentren berechneten wöchentlichen Lösungen werden im IERS Daten- und Informationssystem archiviert, Basis-Metadaten extrahiert und in ein XML-Format umgesetzt. Mit der Umsetzung in XML erfolgt automatisch eine Validierung der Datenfiles.

Für die zuvor beschriebenen Schritte bedarf es zunächst eines Abgleichs der technikspezifischen Gegebenheiten, d.h. Diskussionen innerhalb der Techniken sowie zwischen den Techniken, um ein technikübergreifendes konsistentes SINEX-Format zu erhalten. Nur so kann der Datenaustausch von den Ergebnissen der einzelnen Beobachtungstechniken bis hin zur Verfügbarkeit kombinierter Ergebnisse in einer einheitlichen und standardisierten Form ermöglicht werden. Die Verwirklichung einer standardisierten Datenhaltung vom Beobachtungslevel bis zu den kombinierten Ergebnissen ist ein wichtiger Schritt zur Umsetzung von GGOS.

Zur Unterstützung der Validierung von Zeitreihen soll die Integration von externen geodätisch-geophysikalischen Datenreihen des IERS Global Geophysical Fluids Centres (GGFC) in das IERS Daten- und Informationssystem soweit möglich und sinnvoll in Echtzeit erfolgen. Hierzu ist zunächst eine Standardisierung der GGFC-Daten<sup>1</sup> in Kooperation mit allen acht Sub-Bureaus des IERS GGFC erforderlich, da die Produkte in sehr heterogenen Formaten vorliegen und in unterschiedlichen Zeitabständen aktualisiert werden. Es sollen Prozeduren entwickelt werden, um die Produkte insbesondere der IERS Sub-Bureaus Atmosphäre, Oceans und Loading täglich zu ergänzen und die Datenreihen für den Validierungsprozess bereit zu stellen.

Mittels der XML-Technik können vom Nutzer Zeitreihen über alle im Metakatalog enthaltenen Parameter generiert und in definierten Ausgabeformaten für weitere Untersuchungen ausgegeben werden. Neben vorgegebenen „Standard“-Zeitreihen, wie z.B. Koordinaten, EOP, Koordinatenursprung oder Schwere, können auch spezielle Zeitreihen erstellt werden, die die Nutzer aus den unterschiedlichen geowissenschaftlichen Fachbereichen optimal an ihre Bedürfnisse anpassen können.

Darüber hinaus sollen in Kooperation mit den an der FGS beteiligten Institutionen die Daten- und Zeitreihen aus dem Bereich Gravimetrie und Altimetrie informationstechnisch erschlossen werden. Hierzu müssen Schnittstellen auf der Basis der XML-Technologie entwickelt werden. Ziel ist es, die Zeitreihen in-situ zu erzeugen, um jeweils auf den aktuellsten Datenbestand zuzugreifen und eine redundante Vorhaltung von Datenreihen zu vermeiden. Hier soll ebenfalls auf der Nutzeroberfläche eine einfache Steuerung möglich sein, wobei der Schwerpunkt auf der Visualisierung der Zeitreihen liegen soll, um in Kombination von Eingabe und visueller Selektion die gewünschte Datenausgangsbasis zu schaffen.

Zur Steigerung der Benutzerfreundlichkeit soll ein Tool entwickelt werden, mit dem sich der Nutzer über ein Web-Interface beliebige Daten zusammenstellen, verknüpfen und in einem „beliebigen“ nutzerdefinierten Format ausgeben kann. Gleichzeitig sollen die Nutzer die Möglichkeit haben, über eine Auftragserteilung Daten automatisch beziehen zu können.

### **3.2.2 FGS Methodenbank, Verknüpfung der geodätisch-geophysikalischen Zeitreihen mit Modellen zur Erdrotation**

#### **Stand der Forschung**

Der momentane Stand zum Thema „Erdrotation“ ist in dem Statusreport „Erdrotation und globale dynamische Prozesse“ (H. Schuh et al., 2003) mit vielfältigen Literaturhinweisen beschrieben.

---

<sup>1</sup> <http://www.iers.org/iers/products/fluids/>

Einige online Werkzeuge für das Monitoring der Erdrotation stehen am IERS Earth Orientation Product Centre (EO PC) zur Verfügung:

- für die interaktive EOP Analysis<sup>1</sup>
- für geophysikalische Anregungsfunktionen<sup>2</sup>
- FORTRAN Unterprogramme für astronomische und geophysikalische Modelle<sup>3</sup>.

Die bereitgestellten Werkzeuge sind für Experten aus dem Bereich der Erdrotation und es sind keine detaillierten Beschreibungen für die Anwendung verfügbar. Die wählbaren Funktionen prozessieren nur einzelne Datenreihen ohne die Möglichkeit verschiedene Effekte zu stapeln, wie z. B. Anregungsfunktionen.

Die Special Bureaus des IERS Global Geophysical Fluids Centre stellen Anregungsfunktionen bereit, jedoch in individuellen nicht abgestimmten Formaten. Ein Weg, um mit heterogenen Daten zu arbeiten, wurde im Rahmen des Geotechnologienprojekts „Integration of Space Geodetic Techniques and Establishment of a User Center in the Framework of the IERS“ am BKG entwickelt (Richter et al., 2005).

Mit der an der TU München entwickelten Astro-Toolbox stehen Lösungen zu „alltäglichen Problemen“ aus dem Bereich Geodäsie, Astronomie und Himmelsmechanik bereit (s. auch Kapitel 2.1.5), die nur eine eingeschränkte Möglichkeit zur Verarbeitung von Beobachtungsreihen bietet.

### **Ziel**

Die im Rahmen des Forschungsprogramms entwickelten und angewendeten statistischen Werkzeuge und Analysemethoden werden in das IERS Daten- und Informationssystem eingebettet, um nach Abschluss des Projekts den allgemeinen Nutzern von GGOS eigenständige Untersuchungen zu erlauben und weitere wissenschaftliche Untersuchungen anzuregen.

Die DFG Forschergruppe Erdrotation, der alle Mitglieder der FGS angehören, hat u.a. einen Antrag zur Entwicklung eines „Earth Rotation Information System ERIS“ gestellt. Hiermit soll die im Rahmen der FGS erarbeiteten Methodenbank erweitert und ergänzt werden. Mit ERIS soll ein wirkungsvolles Werkzeug erstellt werden, um die verschiedenen wissenschaftlichen Modelle für das System Erde und ihre Wechselwirkungen darzustellen. Der Nutzer soll in die Lage versetzt werden, die verschiedenen Interaktionen im System Erde beliebig zu kombinieren und direkt ihre Auswirkungen auf die Erdorientierungsparameter abschätzen zu können. Das wissenschaftsbasierte System ERIS ist sowohl für den Experten als auch für den interessierten Lernenden und Laien gedacht.

---

<sup>1</sup> <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/analysis/eop.html>

<sup>2</sup> <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/analysis/excitation.html>

<sup>3</sup> <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/models.html>

### 3.3 Metadatenkatalog

#### Stand der Forschung

Die in den weltweit bestehenden Datenzentren verfügbaren geodätischen und geophysikalischen Daten werden i.d.R. in einfachen Datei-Systemen organisiert, die i.d.R. keine Metainformationen zu den verfügbaren Daten bereitstellen und somit die Recherche in den Datenbeständen sehr einschränken. 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. Dies erschwert das Auffinden und Vergleichen der im Rahmen eines IGGM zu berücksichtigenden Daten und macht ihre integrierte Behandlung nahezu unmöglich.

Allerdings ist die immense Bedeutung der Verwaltung von Metainformationen zu den verfügbaren Datenreihen in den letzten Jahren bereits in einigen wenigen Datenzentren, wie z.B. im CHAMP ISDC oder im IERS Datenzentrum, berücksichtigt worden. Dabei erfolgte jedoch keine Abstimmung zwischen den Datenzentren und die verfügbaren Metainformationen sind kaum in übergeordnete Metainformationssysteme (MIS) eingegliedert worden.

Um MIS nutzen zu können, müssen die Metadaten entsprechend einem ISO Standard strukturiert sein. Allerdings wird die hierzu erforderliche Mehrarbeit für die Aufbereitung der Metadaten gerade im wissenschaftlichen Bereich häufig nicht anerkannt.

Zu allen Daten und Produkten des IERS werden in Anlehnung an die ISO19115 standardisierte Metadaten zu ihrer genaueren Beschreibung erzeugt und in einer Metadatenbank abgelegt. Mit den Metadaten stehen den Nutzern alle Informationen zur Verfügung, um die gewünschten Daten aus der Menge der zur Verfügung stehenden Produkte in einfacher Art und Weise zu identifizieren. Da das Suchinterface des neu entwickelten IERS Informationssystem direkt auf die Metadatenbank zugreift, können die Nutzer in allen Daten und Produkten des IERS umfangreiche und komfortable Recherchen anstellen und die Daten vom zentralen IERS Datenzentrum downloaden. Durch die Integration der Metadaten in sog. Metainformationssysteme, wie z.B. das vom BKG entwickelte Geomis.Bund®<sup>1</sup>, werden zudem neue Nutzerkreise erschlossen.

Im Rahmen einer DFG finanzierten CODATA Arbeitsgruppe wurden Defizite in der Verfügbarkeit wissenschaftlicher Daten, insbesondere zur interdisziplinären Datennutzung, identifiziert und die Ursachen analysiert. Von dieser Arbeitsgruppe wurde ein Konzept zur Verbesserung der elektronischen Datenbereitstellung, basierend auf dem Digital Object Identifier (DOI), erarbeitet, wobei auch Möglichkeiten zu dessen Umsetzung aufgezeigt wurden.

#### Ziel

Internationale Metadatenkataloge ermöglichen die gezielte Suche nach Datenstrukturen in einem übergeordneten Zusammenhang. Hierdurch wird es erleichtert auch Datensätze aus benachbarten Fachdisziplinen zu finden. und die enthaltenen Datensätze können einen größeren Anwenderkreis zugeführt werden. Dies ist von besonderer Bedeutung, da weltweit eine Vielzahl von Daten mit enormen personellen und finanziellen Aufwand erzeugt werden, die häufig aber nur einem eingeschränkten Nutzerkreis bekannt sind. Hierzu müssen die Metadaten zu den Datensätzen in standardisierter Form in die Systeme eingepflegt werden. In

---

<sup>1</sup> <http://puppis.geomis.bund.de/geoportal/index.jsp>

diesem Kontext sind die ISO-Standards für Geodaten auf ihre Anwendbarkeit in Bezug auf die Daten aus dem Umfeld der Erdrotation und der Referenzsysteme zu überprüfen. Sofern diese gegeben ist muss ein Transformationsprozess des Metadatensatzes entsprechend der ISO als Vorbereitung für die Integration in internationale Metainformationssysteme entwickelt werden.

Mit Schnittstellen von und zu anderen Geodatenquellen soll der Bekanntheitsgrad bzw. der Anwenderkreis der Daten des IERS gesteigert werden und die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachbereichen des Geotechnologienprojektes gefördert werden. Die XML-Technologie stellt hier zusammen mit den 19100-er Standards der ISO die Grundlagen bereit. Als Einstieg können die Metadaten der Produkte im ISO 19115 Format in bestehende Metainformationssysteme eingebunden werden und so weit über den geodätischen Nutzerkreis Anwendung finden und neue wissenschaftliche Untersuchungen stimulieren.

Berücksichtigung der Entwicklungen im Geotechnologienprojekt „Information Systems in Environmental Management: From Geodata to Geoservices“ und Studium der Metadatenstrukturen bei Datenzentren für globale Netzwerke wie z. B. GESIS, Global Runoff Data Centre (GRDC), World Data Centre Climate (WDCC), usw.

Alternativ zu den ISO-Standards wird das Konzept des Data Object Identifier (DOI) untersucht, um die im Projekt erarbeiteten Daten einem breiten wissenschaftlichen Nutzerkreis zuzuführen und gleichzeitig die „Eigentumsrechte“ zu sichern. Berücksichtigt werden hierbei die Ergebnisse der DFG Ausschuss "Wissenschaftliche Literaturversorgungs- und Informationssysteme".

### 3.4 Tabellarische Zusammenfassung der Ziele

#### Anforderungen an einen echtzeitnahen Datentransport

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
VLBI-Beobachtungen	Steigerung der Speicherkapazität	Nutzung handelsüblicher Magnetplattensysteme
VLBI-Beobachtungen	Steigerung der elektronischen Datenübertragungskapazität	Anmietung einer 155 Mbit/s Datenleitung
VLBI-Korrelation	Verkürzung der Akkumulationsperioden beim Korrelationsprozess	Einsatz leistungsfähigerer Computer am Korrelator
VLBI-Auswertung	Automatisierung der Auswertesoftware	Weiterentwicklung des VLBI-Expertensystems
GNSS Datentransport	Erweiterung der Funktionalität des IGS/EUREF/GREF Datenzentrum des BKG	Zugriff über HTML-Browser
Echtzeitanwendungen	Nutzung von Echtzeitdatenströmen	Entwicklung von Programmen zur Echtzeitanalyse
Echtzeitnaher Datentransport	Schneller Datentransport von SLR, DORIS Messungen, Ergebnisse von Altimeter- und Schwerefeldmissionen	Koordination der Datenzentren

#### Datenhaltung und Informationsgewinnung

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Datenhaltung	Ausbau des IERS Daten- und Informationssystems zur zentralen Schnittstelle für die Anwender: Abgleich der technikspezifischen SINEX Files, Konsolidierung von geodätisch geophysikalischen Datenreihen	Konsequente Einführung der XML-Technologie, erweitere WEB Interface Werkzeuge, Visualisierung der Zeitreihen
FGS Methodenbank	Entwicklung eines „Earth Rotation Information System, ERIS“ zur Darstellung wissenschaftlicher Modelle für das System Erde und ihre Wechselwirkungen	Interaktive WEB Interfaces, Integration von statistischen Werkzeugen und Analysemethoden
Metadatenkatalog	Metadaten für geodätische Produkte in Anlehnung an ISO 19115	XML Technologie, ISO 19115
Metadatenkatalog	Data Object Identifier, DOI	Konzept der DFG CODATA Arbeitsgruppe

## 4 Geometrie, Orientierung und Schwerefeld der Erde: Methodische Grundlagen und Verfahren

Hauptziel der Arbeiten der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) bleibt es, einen wesentlichen Beitrag zur wissenschaftlichen Aufgabe der Geodäsie, der zeitabhängigen Ausmessung und Darstellung der Geometrie und des Schwerefeldes der Erde, zu leisten. Dies umfasst die präzise Positionierung von Punkten auf der Erdoberfläche, die Orientierung der Erde im Raum, die Bestimmung der Meeresoberfläche und des Erdschwerefeldes sowie die zeitlichen Veränderungen dieser Zielgrößen. Das Ergebnis ist eine vierdimensionale Raum-Zeit-Geometrie des Systems Erde, in der sämtliche Parameter zu jeder Zeit berechnet und den anderen Disziplinen, an erster Stelle den Geowissenschaften, aber auch Nutzern aus Gesellschaft und Wirtschaft bereitgestellt werden können.

Die Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie die räumliche und zeitliche Auflösung der Darstellung sind heute sehr hoch, weil kleinste Änderungen in Raum und Zeit, z.B. als Indikatoren des langsam verlaufenden globalen Wandels oder für echtzeitnahe Warnsysteme vor Naturgefahren, erkannt werden müssen. Die Aufgabe ist deshalb nur durch die Kombination aller hochpräzisen geometrischen und gravimetrischen Beobachtungsverfahren zu erfüllen. Da diese physikalisch wie methodisch eng miteinander verknüpft sind, ist die Erforschung und Entwicklung rigoroser und konsistenter Kombinationsmethoden von geometrischen und gravimetrischen Verfahren eine wesentliche Herausforderung dieser Dekade.

Zunächst müssen die Verfahren einzeln analysiert und von ihren Unzulänglichkeiten (z.B. systematischen Fehlern und Einflüssen) befreit werden. Bei der Kombination ist auf die Verwendung einheitlicher Konstanten, Konventionen, Modelle und Parameter zu achten. Die kombinierten Zielgrößen dienen einerseits als Grundlagen für die geowissenschaftliche Forschung (Geodynamik, globaler Wandel u.a.), andererseits zur Anwendung auf vielen Gebieten der Praxis (Landes-, Kataster-, Ingenieurvermessung, Geoinformationssysteme, Navigation, Raumfahrt). Sie bilden einen wesentlichen Beitrag zu einem Global Geodetic Observing System (GGOS), das auch von der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) als eine zentrale Aufgabe der nächsten Dekade herausgestellt wurde.

Die geplanten Forschungsarbeiten sollen nach der folgenden Gliederung dargestellt werden:

- Geodätische Punktfelder
  - Präzise Punktpositionierung
  - Referenzsysteme
  - Echtzeitnahe Parameterbestimmung
- Orientierung und Rotation der Erde
  - Nutationsmodell
  - Polbewegung und UT1
- Meeresoberfläche
  - Kinematische Meeresoberfläche
  - Analyse und Nutzung mariner Schweredaten
  - Entwicklungen für einen „International Altimeter Service“
- Schwerefeld
  - Schwerefeld-Satellitenmissionen
  - Terrestrische Gravimetrie
  - Darstellungsformen des Erdschwerefeldes
- Kombinierte Verfahren
  - Höhensysteme
  - Dynamisches Erdsystemmodell

## 4.1 Geodätische Punktfelder

### 4.1.1 Stand der Forschung

Die geodätischen Positionierungsverfahren, das sind vor allem „Satellite Laser Ranging“ (SLR), „Global Navigation Satellite Systems“ (GNSS) und „Very Long Baseline Interferometrie“ (VLBI), haben in der letzten Dekade, vor allem durch die Einrichtung internationaler wissenschaftlicher Dienste, einen großen Fortschritt in Genauigkeit und Zuverlässigkeit erreicht. Die FGS hat zu dieser Entwicklung durch intensive Beteiligung an der internationalen wissenschaftlichen Kooperation und in den Diensten wesentlich mitgewirkt. Wichtige Aktivitäten der letzten fünf Jahre waren innerhalb des International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) das gemeinsame Combination Research Center (CRC) der FGS und des GeoForschungsZentrums (GFZ) Potsdam sowie die Funktionen als IERS Central Bureau (BKG), ITRS Combination Center (DGFI) und als IERS Analysis Coordinator (FESG), die im Rahmen des Geotechnologienprogramms von BMBF und DFG gefördert wurden (Rothacher et al., 2003). Daneben arbeiteten die Institutionen der FGS als Daten-, Analysen- bzw. Kombinationszentren für den International GNSS Service (IGS), International Laser Ranging Service (ILRS) und International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)(siehe z.B. Annual Reports der Dienste).

Bei den Positionierungsverfahren ist heute bei hinreichend langen Beobachtungszeiten global bereits eine höhere Genauigkeit als  $10^{-9}$  (bezogen auf den Erdradius, d.h. besser als  $\pm 6$  mm) erreicht. Allerdings gilt dies nicht für die radiale Komponente (Höhe). Vor allem die systematischen Einflüsse (instrumentell und in den Ausbreitungswegen der Messsignale) führen zu technikabhängigen, schwer zu reduzierenden Fehlern. Die Kombination verschiedener Positionierungsverfahren erlaubt zwar die Elimination oder Reduktion vieler Effekte, gemeinsame Modellierungsfehler bleiben jedoch erhalten.

Die zeitliche Auflösung und Darstellung der Stationspositionen entspricht noch nicht den Anforderungen. So werden z.B. saisonale, episodische oder anomale Effekte i.A. nicht als Bewegungsparameter dargestellt sondern teilweise aus den Messungen reduziert (z.B. als Auflasteffekte oder Sprünge) oder in die säkularen (linearen) Geschwindigkeiten integriert (Abb. 4.1). Die seit vielen Jahren durchgeführten Messungen wurden teilweise noch nicht mit den heute vorliegenden genaueren Analysemethoden und Modellen ausgewertet. Die FGS hat sich in gezielten Projekten insbesondere der Analyse von Zeitreihen und der Reprozessierung langer Messreihen (GPS) gewidmet.

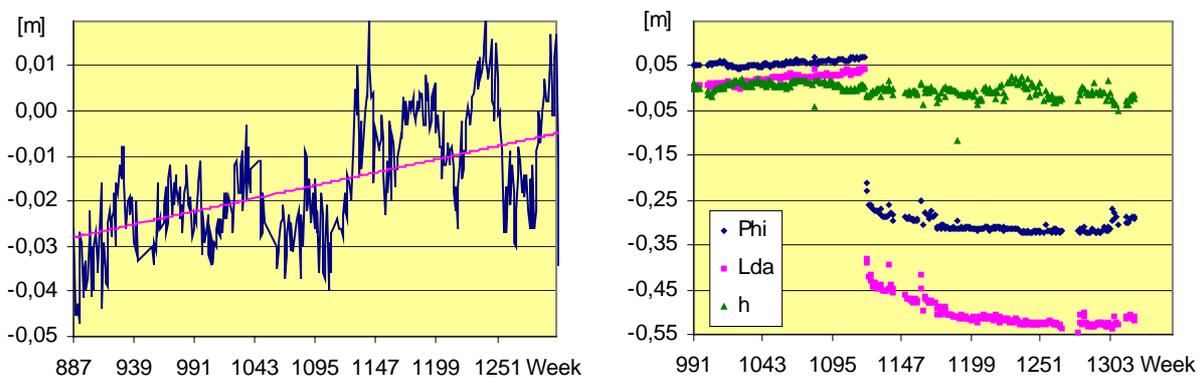


Abbildung 4.1: Beispiele von Zeitreihen mit saisonalem Signal (links: Höhe der GPS-Station Brasilia) bzw. Koordinatensprung (rechts: GPS-Station Arequipa, Peru) nach Erdbeben im Juni/Juli 2001 (Woche 1119) und anschließend nicht-linearer Bewegung

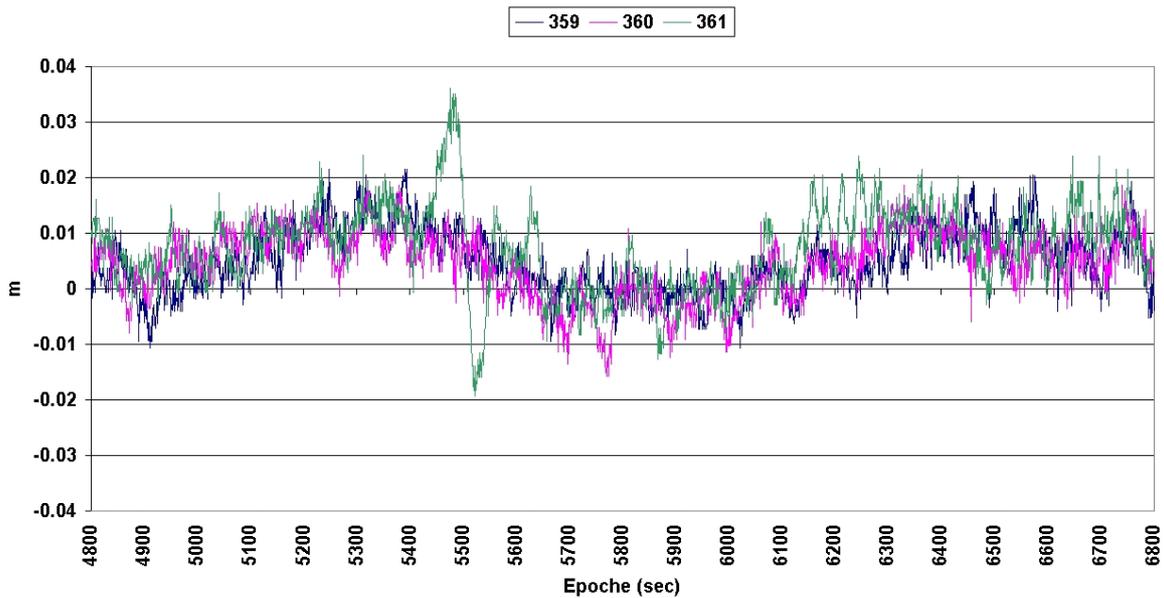


Abbildung 4.2: Nord-Süd-Komponente der Basislinie Kitzingen - Wettzell nach dem Sumatra-Beben (Ausschnitt der Tage 359, 360, 361 des Jahres 2004, d.h. 24.- 26.12.2004) mit Sekunden-Auflösung, in der die Deformation durch die Erdbebenwelle am 26.12.2004 zu sehen ist.

Das Zälestische und das Terrestrische Referenzsystem werden heute, ebenso wie die sie verbindenden Erdorientierungsparameter (EOP), unabhängig voneinander als „International Celestial Reference Frame“ (ICRF) und „International Terrestrial Reference Frame“ (ITRF) bestimmt. Dadurch entsteht eine Inkonsistenz, die keine gemeinsame Interpretation und Nutzung zulässt. In der FGS wurde erstmals eine konsistente, simultane Berechnung von TRF, CRF und EOP durchgeführt (Tesmer et al., 2004). Die Kinematik des ITRF bezieht sich auf ein geologisch-geophysikalisches Modell (NNR NUVEL-1A), das die ausgedehnten Deformationszonen der Erdoberfläche (z.B. den mediterranen 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.

Auf der Fundamentalstation Wettzell werden mehrere Empfänger satellitengestützter Navigationssysteme betrieben. Diese für den Empfang von GPS- und GLONASS-Signalen ausgelegten Empfangssysteme sind in internationale (IGS, EUREF) und nationale (GREF) Netze eingebunden. Während für die Koordinatenbestimmung in diesen Netzen eine Datenrate von 30 Sekunden verwendet wird, zeichnen einige der Stationen mit der sehr viel höheren Frequenz von 1 Hz auf, die sich für die Echtzeitpositionierung eignet. Mit 1-Sekunden-Daten deutscher Stationen lassen sich die als Folge eines Starkbebens über die Erdoberfläche fortpflanzenden Oberflächenwellen selbst ca. 9000 km vom Erdbebenherd entfernt nachweisen (Abb. 4.2). Diese Nutzung satellitengestützter Raumverfahren zur Erfassung geometrischer Veränderungen der Erdoberfläche erweitert die Beobachtungsstationen zu allgemeinen Geosensoren.

## 4.1.2 Forschungsziele

### **Präzise Punktpositionierung**

Das zentrale Forschungsziel ist die Nutzung der geodätischen Weltraumbeobachtungen als Positionierungsverfahren für ein globales geodätisches Beobachtungssystem in robusten, konsistenten Referenzsystemen. Die Modellierung der einzelnen Beobachtungsverfahren soll auf ein Niveau gebracht werden, das den höchsten Anforderungen in Genauigkeit, Zuverlässigkeit und zeitlicher Auflösung entspricht. Dafür sind die physikalischen und mathematischen Modelle zu verfeinern sowie die Datenverarbeitung weiter zu automatisieren. Einen Schwerpunkt wird die Einbeziehung des europäischen Navigationssystems Galileo in die Modelle bilden.

Bei den physikalischen Modellen sind vor allem die Ionosphäre und die Troposphäre sowie die atmosphärischen und ozeanischen Auflasten zu untersuchen. Während für die Ionosphäre in der geodätischen Anwendung bis heute nur die Laufzeitverzögerung der elektromagnetischen Signale im Vordergrund stand, die im Allgemeinen im Zenit modelliert und dann durch einfache mathematische Funktionen auf beliebige Höhenwinkel übertragen wird, soll hier 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 und das NeQuick-Modell des ICTP Trieste), deren Parameter aus geodätischen Beobachtungen (GPS, Altimetrie) verbessert werden können. Aus solchen verbesserten Modellen lassen sich mit geeigneten hochauflösenden Darstellungsmethoden (z.B. sphärische Wavelets oder Splines) die für die geodätischen Beobachtungen erforderlichen Reduktionsgrößen besser ableiten.

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.

Die ozeanischen Auflasteffekte werden von vielen Wissenschaftlern erforscht und in recht guten Modellen erfasst. Für die atmosphärischen Auflasten gibt es jedoch 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 noch 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).

Bei der Kombination der verschiedenen Beobachtungstypen ist vor allem die Konsistenz der benutzten Konstanten, Konventionen und Modelle sowie die unverzerrte Parameterschätzung wichtig. Die bisher bei der Erstellung von Referenzsystemen übliche Kombination von bereits ausgeglichenen Parametern sollte durch die Akkumulation von datumsfreien (singulären) Normalgleichungen ersetzt werden. Die optimale Kombination der Normalgleichungen (Skalierung, Gewichtung durch Kovarianzkomponentenschätzung, Datumsfestlegung) wird weiter erforscht werden. Ziel ist die Realisierung unverzerrter Referenzsysteme in einer gemeinsamen Schätzung von zälestischem und terrestrischem Referenzsystem sowie den verbindenden Parametern von Nutations- und Erdrotationsparametern.

## Referenzsysteme

Referenzsysteme bilden die Grundlage für nahezu alle Arbeiten in der geodätischen Positionierung, Navigation, Raumfahrt, Referenzierung in Geoinformationssystemen und vielen weiteren Anwendungen sowie für die Erdsystemforschung. Die verschiedenen geodätischen Raumbeobachtungsverfahren (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 Datumsparameter (Koordinatenursprung, Orientierung und Maßstab) untersucht und mit geeigneten Algorithmen zur Datumsfestlegung genutzt werden. Ziel ist es, bei der Kombination der Beobachtungsverfahren 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.

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 Beobachtungstechniken und eine nicht verzerrende Auswertemethode. Ein weiterer Schritt zur Genauigkeitssteigerung der Ergebnisse ist die verbesserte Parametrisierung der zeitabhängigen Stationspositionen. Dazu sollen bisher nicht berücksichtigte periodische Schwingungen 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.

Von grundlegender Bedeutung für die Berechnung eines terrestrischen Referenzsystems ist die Verknüpfung der (globalen) Netze der verschiedenen Techniken. Dies ist nur mit Hilfe von lokalen terrestrischen Verbindungsmessungen („local ties“) zwischen direkt benachbarten Instrumenten verschiedener Techniken auf Kollokationsstationen möglich. Es sollen Strategien zur Auswahl geeigneter Stationen zur Verknüpfung der Techniken entwickelt sowie der Einfluss eventueller Fehler in den terrestrischen Messungen auf die kombinierten Parameter abgeschätzt und Möglichkeiten zu ihrer Elimination untersucht werden.

Die FGS wird 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 zu untersuchen. Dazu sollen Simulationsstudien durchgeführt werden mit dem Ziel, eine optimale Kon-

figuration der auszuwählenden Daten aus der überaus großen Anzahl der Messungen zu ermitteln.

### **Echtzeitnahe Parameterbestimmung**

Unter einer echtzeitnahen Parameterbestimmung versteht man im weit gefassten Sinne die Verarbeitung anfallender Daten einschließlich der Verfügbarkeit des Ergebnisses innerhalb des Zeitraums bis zum Eintreffen neuer Daten. Im International GNSS Service (IGS) werden sogenannte Ultra Rapid Products (präzise GPS-Orbitparameter und Erdrotationsparameter) bestimmt. Der Zeitraum für diese Produkte liegt bei sechs Stunden. Es werden jeweils die GPS-Beobachtungen der vergangenen sechs Stunden zur Parameterschätzung neu hinzugenommen. Voraussetzung dafür ist die hochfrequente Datenlieferung z.B. im Stundentakt. Die Bereitstellung der Ergebnisse erfolgt dann nach drei Stunden.

Eine weitergehende Untersetzung der Stundendaten in z.B. 15-Minuten-Datenarchiven ist denkbar und sollte technisch keine Probleme mit sich bringen. Mit den derzeit üblichen Auswertemethoden stößt man jedoch bald an Grenzen. In gängigen Auswerteprogrammen werden die Parameter nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt. Dazu werden im allgemeinen sämtliche Beobachtungen aus dem Beobachtungszeitraum einbezogen.

Innerhalb des EUREF-Netzes permanent betriebener GNSS-Stationen ist inzwischen mehr als die Hälfte der Stationen auf eine stundenweise Datensicherung und Datenabgabe umgestellt. Diese sogenannten Stundendaten werden für Anwendungen in Nahezu-Echtzeit verwendet. Darunter versteht man solche Anwendungen, die regelmäßig jede Stunde eine Parameterschätzung durchführen und deren Ergebnisse deutlich innerhalb der Stunde bis zur nächsten Datenabgabe vorliegen. Als Beispiel kann die Schätzung der Laufzeitverzögerung innerhalb des Projektes COST 716 dienen, bei dem seit 2002 für mehr als 400 Stationen europaweit stündlich die Laufzeitverzögerungen berechnet werden. Zehn Analysezentren senden ihre Ergebnisse stündlich an das UK MetOffice, wo sie für eine Verwendung in der numerischen Wettervorhersage aufbereitet werden. Mit dieser Methodik ist es auch denkbar, andere Parameter, beispielsweise Koordinaten zu bestimmen.

Zur Beseitigung der Schwierigkeiten ist ein neuer Ausgleichungsansatz zu erproben, bei dem die Beobachtungen nacheinander verarbeitet werden. Die Anwendung dieser Filtertechnik ist im Prinzip unabhängig von der Datensicherung. Es können sowohl Beobachtungen prozessiert werden, die in Datenarchiven über einen bestimmten Zeitraum, z.B. Stunden, gesammelt werden, als auch Beobachtungen, die sequentiell bereitgestellt werden, z.B. über einen Echtzeitdatenstrom. Der Vorteil dieser Methode ist, dass für jede Beobachtungsepoche Zielparameter, z.B. Koordinaten, bestimmt werden können. Somit ist ein Echtzeitmonitoring möglich.

Mit dem Monitoring der Referenzsysteme und einer echtzeitnahen Datenanalyse stehen folgende potentiellen Arbeiten der FGS in Verbindung:

- Elektronische VLBI (eVLBI, siehe 3.1.1),
- Verknüpfung von hochfrequenten Laser-Kreiselpbeobachtungen mit VLBI- und GPS-Messungen zur Bestimmung von Zeitreihen für Erdrotationsparameter (siehe 4.2.2),
- Entwicklung von Komponenten für die globale und regionale GNSS-Real-Time-Positionierung im Dezimeter-Genauigkeitsniveau.

## 4.2 Orientierung und Rotation der Erde

### 4.2.1 Stand der Forschung

Die kinematische Beschreibung der Erdorientierung stellt die zentrale Verbindung zwischen den Referenzsystemen dar. Die Transformation vom zälestischen (CRS) zum terrestrischen Referenzsystem (TRS) erfolgt über das zälestische und das terrestrische intermediäre System, deren gemeinsame dritte Achse der zälestische intermediäre Pol (CIP, frühere Bezeichnung: zälestischer Ephemeridenpol, CEP) ist. Als erste Achse des zälestischen intermediären Systems wurde aufgrund eines Beschlusses der Internationalen Astronomischen Union (IAU) das wahre Frühlingsäquinoktium durch den zälestischen Ephemeridenursprung (CEO) ersetzt. Diese Bezugsachse zeichnet sich dadurch aus, dass sie relativ zum CRS keine Bewegungskomponente parallel zum Äquator besitzt ("non-rotating origin"). Gleichzeitig wurde zur Beschreibung der Bewegung des zälestischen intermediären Poles relativ zum CRS ein neues Präzessions- und Nutationsmodell (IAU 2000) eingeführt (z.B. Capitaine et al., 2003).

Da das mittlere Frühlingsäquinoktium somit nicht mehr unmittelbar als Bezugsachse dient, beschreibt der Präzessionsteil des neuen Modells im Gegensatz zum früheren Präzessionsmodell (IAU 1976) nicht mehr die Richtung der Ekliptiknormalen, sondern nur noch die Richtung des mittleren Pols. Die IERS-Konventionen 2003 schlagen deshalb zur Transformation vom CRS zum zälestischen intermediären System einen Ansatz vor, bei dem die Präzession des mittleren Pols in bezug auf die festgehaltene Ekliptik der Epoche J2000,0 dargestellt wird. Dagegen beschreibt der Nutationsteil des neuen Modells (ebenso wie das alte Nutationsmodell IAU 1980) die Richtungsabweichung des zälestischen intermediären Pols vom mittleren Pol in bezug auf die momentane Ekliptik. Die Nutationsparameter müssen deshalb im Ansatz der IERS-Konventionen von der momentanen Ekliptik auf die Ekliptik der Epoche transformiert werden, was nur näherungsweise möglich ist.

Das neue Modell der Nutation (MHB2000) ist kein streng physikalisches Modell, da einige der Terme durch Assimilierung an vorhandene VLBI-Beobachtungen bestimmt wurden. Heute stimmen die Ergebnisse der VLBI-Messungen und das Modell im Bereich von 1 bis 2 Millibogensekunden überein. Ein Defizit ist allerdings das Fehlen eines strengen geophysikalischen Modells, das auch die freie Nutation des Erdkerns (Free Core Nutation) enthält. Da diese nicht oder nur ungenau präzifizierbar ist, kann auch weiterhin nicht auf die Bestimmung von Nutationskorrekturen durch Beobachtungen verzichtet werden.

In der praktischen Bestimmung sind die Orientierungs- und Rotationsparameter der Erde derzeit nicht mit dem zälestischen (ICRF) und terrestrischen (ITRF) Referenzsystem konsistent, da sie unabhängig voneinander berechnet werden (siehe 4.1). Die zeitliche Auflösung der Erdorientierungsparameter hat noch nicht den für die höchsten Anforderungen notwendigen Grad (sub-täglich) erreicht. Dies kann erst dann mit ausreichender Genauigkeit und Zuverlässigkeit erreicht werden, wenn – wie die Beobachtungen anderer Verfahren – auch die VLBI-Messungen ununterbrochen durchgeführt werden.

### 4.2.2 Forschungsziele

Im Vordergrund der Forschung stehen die Arbeiten zur Implementierung des neuen Präzessions-Nutations-Modells (IAU2000) sowie die Bestimmung und Interpretation der subtäglichen Variationen der Polbewegung und der Rotationsgeschwindigkeit bzw. der Tageslänge. Diese Arbeiten bilden auch einen Schwerpunkt der DFG-Forschergruppe Erdrotation, an der sich die FGS intensiv beteiligt. Ziel ist ein integrativer Ansatz zur Modellierung der Erdrotation.

### Präzessions- und Nutationsmodell

Nach Einführung des neuen Präzessions- und Nutationsmodells (IAU2000) sollen zur Transformation vom CRS zum zälestischen intermediären System verschiedene Ansätze erprobt werden (Abb. 4.3). Sinnvoll erscheint die Einbeziehung der Ekliptiknormalen in das Präzessionsmodell, derart dass ihre Bewegung relativ zum CRS die gleiche ist wie im alten Präzessionsmodell. Dann werden jedoch die Parameter, welche die Richtung der Ekliptiknormalen in bezug auf das mittlere Äquatorsystem beschreiben, von denen des alten Präzessionsmodells abweichen, weil die Richtung des mittleren Poles jetzt genauer modelliert wird. Mit solch einer Ergänzung des neuen Präzessionsmodells kann nicht nur die Nutation in konsistenter Weise mit der Präzession verknüpft werden, sondern die bisherigen Rechenprogramme für die Transformation vom CRS zum wahren Äquatorsystem (dessen erste Achse zum wahren Frühlingsäquinoktium gerichtet ist) können für die strenge Transformation zum neuen zälestischen intermediären System weitgehend beibehalten werden. Benötigt wird als weiterer Parameter der Winkel zwischen dem wahren Frühlingsäquinoktium und dem neuen zälestischen Ephemeridenursprung. Die periodischen Anteile dieses Winkels entsprechen in etwa der früheren Gleichung der Äquinoktien.

Für die verschiedenen Präzessionsparameter, die im Präzessionsteil des neuen Modells IAU 2000 nicht enthalten sind, sowie für den Winkel zwischen dem wahren Frühlingsäquinoktium und dem zälestischen Ephemeridenursprung sollen Reihendarstellungen, die mit dem neuen Präzessions- und Nutationsmodell im Einklang stehen, abgeleitet und zur Einarbeitung in Rechenprogramme zur Auswertung geodätischer Raumbeobachtungen aufbereitet werden.

### Erdorientierung, Polbewegung und UT1

Eine zentrale Rolle des Forschungsprogramms im Bereich der Orientierung und Rotation der Erde spielt die Bestimmung und Interpretation der subtäglichen Variationen der Polbewegung und der Rotationsphase der Erde bzw. der Tageslänge. Im Rahmen der DFG-Forschergruppe Erdrotation (siehe 5.2) soll ein integrativer Ansatz der Modellierung der Erdrotation unter Einbeziehung von Modellen für die unterschiedlichen Antriebskräfte (Atmosphäre, Hydrosphäre, feste Erde) entwickelt werden. Einen wertvollen zusätzlichen Sensor für die Auflösung im subtäglichen Bereich stellt der Laserkreisel dar, dessen Ergebnisse mit denen der

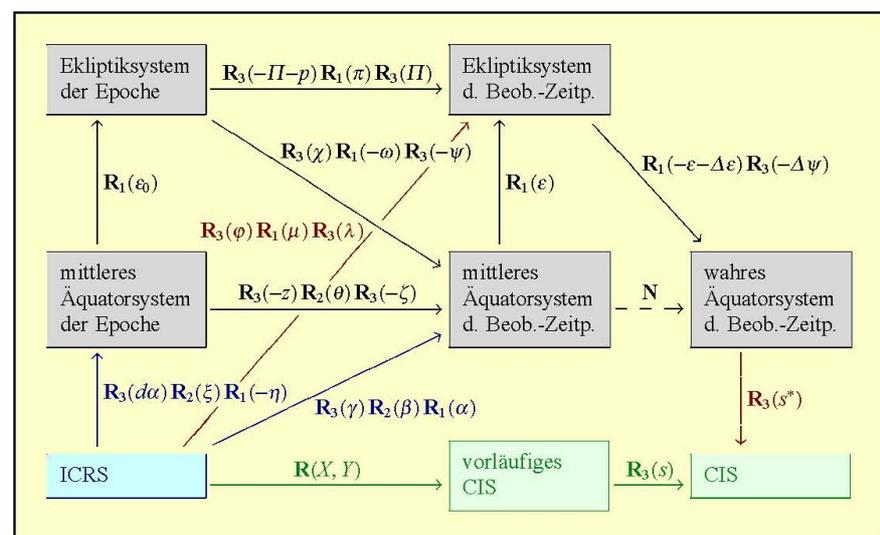


Abbildung 4.3: Alternative Transformationswege für ein umfassendes Präzessions- und Nutationsmodell

Weltraumverfahren in einem gemeinsamen Modell zusammenzufassen sind.

Die gemeinsame Schätzung des zälestischen und terrestrischen Referenzrahmens und der zeitabhängigen Erdorientierungsparameter in einer Gesamtausgleichung ist ein weiteres vorrangiges Ziel. Damit wird deren Konsistenz und Langzeitstabilität gewährleistet. Dabei ist auch der Übergang von dem bisherigen Präzessionsmodell (IAU 1976) auf das neue Präzessions- und Nutationsmodell (IAU 2000) in die Software zu implementieren.

Im Rahmen der DFG Forschergruppe Erdrotation wird von der FGS unter dem Thema "Integration of Earth rotation, gravity field and geometry using space geodetic observations" eine konsistente Schätzung von Erdrotationsparametern, Geometrie (Stationspositionen und deren zeitliche Variationen) und niederen harmonischen Koeffizienten des Erdschwerefeldes angestrebt. Es sollen geeignete Kombinationsmethoden entwickelt werden, um die jeweiligen Stärken der einzelnen Raumbeobachtungsverfahren optimal zu nutzen, sowie Systematiken und Modellfehler aufzudecken. Dabei ist auch zu beachten, dass die zeitliche Auflösung der Parameterbestimmung für die einzelnen Beobachtungsverfahren sehr unterschiedlich ist (z.B. bei VLBI nur episodisch an maximal drei bis vier Tagen pro Woche). Ein Vergleich der geodätisch bestimmten Resultate mit geophysikalischen Zeitreihen ist vorgesehen.

## 4.3 Meeresoberfläche

### 4.3.1 Stand der Forschung

Die Satellitenaltimetrie hat sich in den letzten Jahrzehnten als operationelles Verfahren etabliert, das einerseits zur geometrischen Bestimmung der Figur der Erde und deren Kinematik beiträgt, andererseits hochauflösende Information zum Schwerefeld liefert, weil sich die mittlere Meeresoberfläche - bis auf die dynamische Topographie - nach einer Äquipotentialfläche ausrichtet. Die routinemäßige Überwachung der Meeresoberfläche durch Satellitenaltimetrie wird deshalb ein wesentliches Element in globalen Beobachtungssystemen wie dem Global Geodetic Observing System (GGOS), aber auch dem Global Ocean Observing System (GOOS) bilden müssen. Neue Technologien, wie das Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) auf dem Ice, Cloud and land Elevation Satellite (ICESat) der NASA und die neuartige Radartechnologie (Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter, SIRAL) auf dem ESA-Satelliten CryoSat erschließen weitere Anwendungspotentiale für die Eismassenbilanzierung und die Erkundung des Meereises (siehe dazu Abschnitt 5). Mit den zahlreichen Anwendungsbereichen stellt die Altimetrie für die in der FGS bearbeiteten Themen ein unverzichtbares geodätisches Raumverfahren dar.

Für die speicherintensiven Altimeterdaten wurden im bisherigen FGS Forschungsprogramm flexible, missionsunabhängige Datenstrukturen entwickelt. Sie werden jetzt für die Daten von Geosat, ERS-1, TOPEX/Poseidon, ERS-2, GFO, Jason1 und ENVISAT genutzt. Das generische Format erleichtert die Aktualisierung einzelner Parameter, z.B. für verbesserte Gezeitenmodelle (GOT99.2b, FES2004) oder das Einspielen neuer empirischer Korrekturen für den „sea state bias“. Für Dekodierung und Extraktion der binär gespeicherten Altimeterdaten wurden leistungsfähige Programme erstellt, die auf alle Missionsdaten und viele daraus abgeleitete Produkte anwendbar sind und nutzerdefinierte Auszüge erstellen können. Vor allem die lange, mehr als zehnjährige Zeitreihe von TOPEX/Poseidon wurde genutzt um die Variabilität des Meeresspiegels auf verschiedenen Zeit- und Raumskalen mit harmonischen Analysen und statistischen Verfahren wie der Empirischen Orthogonalfunktionen (EOF) zu erfassen (Bosch, 2001).

Die erheblichen großräumigen Oszillationen des Meeresspiegels (siehe Abb. 4.4) deuten auf sehr langperiodische Vorgänge hin, die auch durch die lange Messperiode von TOPEX/Poseidon noch nicht aufgelöst werden kann. Kleinskalige Vorgänge (Eddy-Bildung) erfordern die gemeinsame Nutzung von mindestens zwei Altimetersystemen mit sich ergänzenden Abtasteigenschaften (wie TOPEX und ERS) und setzen eine sorgfältige relative Kalibrierung voraus. Der bisherigen Praxis, TOPEX als Referenz für andere Altimetersatelliten zu nutzen, erscheint fragwürdig: Verbesserte Bahnbestimmungen mit GRACE weisen nach, dass die bisherigen Bahnen von TOPEX durchaus signifikante geographisch korrelierte Fehler aufweisen. Als Alternative wurde im DGFI ein innovativer Ansatz zur gemeinsamen Kalibrierung aller (bis zu fünf) simultan messenden Altimetersysteme entwickelt und erprobt (Bosch 2005).

Langperiodische oder gar säkulare Entwicklungen, wie die Frage nach dem aktuellen Meeresspiegelanstieg, erfordern dagegen eine sehr hohe Langzeit-Stabilität und gesicherte Anbindung an einen terrestrischen Referenzrahmen, dessen Stabilität selbst in Frage steht. Dem absoluten Vergleich der Meeresoberfläche mit geozentrisch verankerten Pegeln kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu. Durch relative Vergleiche von Pegelmessungen und altimetrischen Zeitreihen der Meereshöhen konnten instrumentelle Driften und systematische Widersprüche erkannt werden. Allerdings müssen dazu vertikale Bewegungsraten an den Pegeln bestimmt werden, um scheinbare und wahre Meeresspiegelentwick-

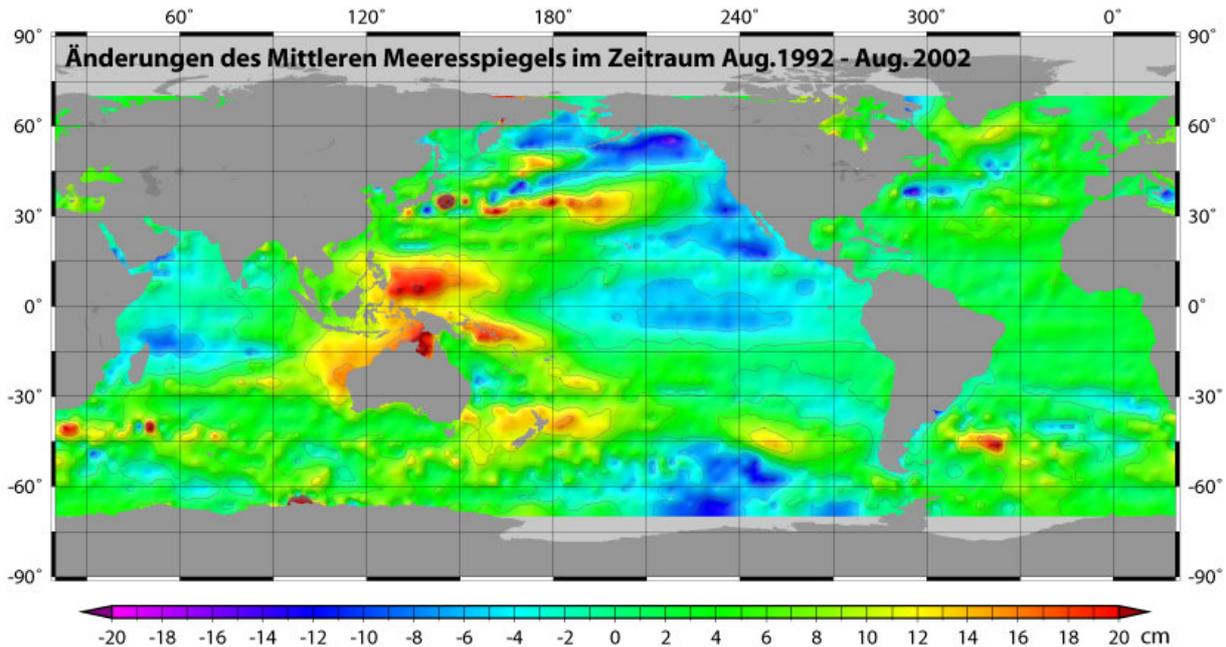


Abbildung 4.4: Zeitliche Entwicklung des mittleren Meeresspiegels im Zeitraum 1992-2002

lungen unterscheiden zu können. Das DGFI beteiligt sich am IGS Pilotprojekt TIGA, wertet kontinuierliche GPS-Messungen an Pegelstationen eines Atlantik-Netzes aus, um Vertikalbewegungen der Pegel zu schätzen und trägt damit auch zur Vereinheitlichung von Höhensystemen bei (siehe 4.5.1).

Im Projekt COSSTAGT, ein Beitrag zum „Ocean Surface Topography Science Team“ für die Jason Mission, wird die Meerestopographie in küstennahen Bereich durch Altimeter -, Schwere - und Pegeldata bestimmt.

Die Satellitenaltimetrie liefert auch hochauflösende Informationen zum Erdschwerefeld, weil sich die mittlere Meeresoberfläche genähert nach einer Äquipotenzialfläche des Schwerefeldes ausrichtet. Die Abweichungen von der Äquipotenzialfläche, die dynamische Topographie, bildet sich durch hydrodynamische Vorgänge aus, kann modelliert werden und die Meeresoberfläche in eine Äquipotenzialfläche überführen. Durch Inversion der Integralformeln von Stokes und Vening Meinesz lassen sich dann marine Schwereanomalien bilden. Mehrere nahezu globale Datensätze bieten eine räumliche Auflösung bis zu  $2' \times 2'$  und sind global bis auf wenige mGal miteinander konsistent. Offensichtlich bestehen aber in den langwelligen Strukturen systematische Differenzen zu den neuen Schwerefeldmodellen, die vor einer Kombination mit den Schwerefeldmodellen von GRACE und GOCE geklärt werden müssen.

### 4.3.2 Forschungsziele

Wegen der grundlegenden Bedeutung der Satellitenaltimetrie für ein globales Erdbeobachtungssystem und die Forschungsarbeiten der FGS sollen die bisherigen Arbeiten zur Altimetrie fortgeführt werden. Als übergeordnete Zielsetzung ist dabei eine möglichst lange Zeitreihe von Altimetermessungen durch konsistente Kombination aller Missionen mit einem gesicherten Bezug zum Geozentrum zu erarbeiten.

#### Kinematische Meeresoberfläche

Die räumliche Beschreibung der Meeresoberfläche und ihrer zeitlichen Veränderungen ist für viele Anwendungen in Geodäsie, Ozeanographie und Geophysik zu einer wichtigen Aufgabe geworden. Die erheblichen, regional aber sehr unterschiedlichen Änderungsraten des Meeresspiegels (mit durchschnittlichen Änderungen bis zu  $\pm 25$  mm/Jahr) lassen eine

„einfache“ Mittelbildung fragwürdig erscheinen. Das Ziel des vorliegenden Projektes ist deshalb die Ableitung eines hochauflösenden, kinematischen Modells des mittleren Meeresspiegels, mit dem mittlere Meereshöhen für beliebige Zeitpunkte, Perioden oder Jahreszeiten berechnet werden können. Dabei stellen sich folgende Teilaufgaben:

- Harmonisierung der Altimeterdaten von Geosat, ERS-1/2, TOPEX / Poseidon, GFO, Jason-1, und Envisat (später evtl. auch von CryoSat). Dies beinhaltet z.B. missionsspezifische Korrekturen wegen instrumenteller Driften, einheitliche Gezeitenkorrekturen und eine konsistente Behandlung des inversen Barometereffektes.
- Relative Kalibrierung der Missionen durch Berechnung und Analyse „gemischter“ Kreuzungspunkte. Mit nahezu gleichzeitigen Kreuzungspunkt-Ereignissen sollen systematische Fehler der radialen Bahnkomponente geschätzt und der Einfluss von Änderungen des Meeresspiegels ausgeschlossen werden.
- Die diskrete Modellierung der Bahnfehler soll durch flexiblere Gewichtsansätze weiter verbessert und auf neue Missionen wie CryoSat und ICESat ausgedehnt werden. Eine gemeinsame Schätzung der empirischen, satellitenspezifischen Korrekturmodelle für den „sea-state-bias“ ist zu untersuchen.
- Entwicklung geeigneter Darstellungsformen für eine kinematische Beschreibung des mittleren Meeresspiegels.
- Genauigkeitsanalyse und Vergleich des kinematischen Meereshöhenmodells mit bisherigen Modellen des mittleren Meeresspiegels (z.B. CLS01, GSFC00).

### **Analyse und Nutzung mariner Schweredaten**

Mit Entwicklungsgraden bis maximal 250 in den Kugelfunktionsreihen werden die neuen Schwerfeldmissionen GRACE, insbesondere GOCE erhebliche Verbesserungen für die lang- bis mittelwelligen Strukturen des Erdschwerfeldes ermöglichen. Die notwendige „Fortsetzung nach unten“ bleibt als Aufgabe bestehen: die Satellitenmessungen erfolgen in Flughöhe, das Schwerfeld soll jedoch bis an die Erdoberfläche bestimmt werden. Dabei besteht die Gefahr, dass z.B. Schwereanomalien durch Bezug auf inkonsistente Höhensysteme systematische Fehler aufweisen. Es ist deshalb zu untersuchen,

- ob Schwerfelddaten der Erdoberfläche mit den langwelligen Strukturen der Satellitenlösungen des Schwerfeldes kompatibel sind,
- in welchem Umfang zusätzliche Schwerfeldbeobachtungen an bzw. nahe der Erdoberfläche die Normalgleichungen der Satellitenlösungen stabilisieren können und
- ob und wie weit der Entwicklungsgrad der Schwerfeldmodelle durch Schweredaten von der Erdoberfläche erhöht werden kann.
- Die Kombination von Satellitenlösungen des Schwerfeldes und Schweredaten der Erdoberfläche erfordert geeignete numerische Verfahren (wie z.B. des Lanczos Algorithmus) zur Lösung und Konditionsbestimmung sehr großer Gleichungssysteme.

### **Entwicklungen für einen „International Altimeter Service“**

Ein internationaler Dienst, wie z.B. bei den Positionierungsverfahren GPS, VLBI und SLR gibt es in der Altimetrie noch nicht. Eine von IAG und GLOSS autorisierte Planungsgruppe hat die Einrichtung eines „Internationalen Altimetrie Service“ erörtert. Es besteht der allgemeine Konsens, dass ein internationaler Altimeter Dienst notwendig ist. Er kann aber nur mit Unterstützung der Raumfahrtagenturen (ESA, NASA, CNES) und auf der Basis bereits existierender internationaler Dienstleister (AVISO, NOAA, PODACC, JPL, RADS) in Form einer virtuellen Organisation mit verteilten Ressourcen aufgebaut werden.

Die GRID-Technologie ist ein Web-basierter Dienst, der unter Wahrung verschiedener Zugriffsrechte verteilte Ressourcen für Rechenleistung und Datenspeicherung bereitstellt – eine ideale Entwicklung für den geplanten Altimeterdienst.

Die FGS wird sich maßgeblich am Aufbau eines Internationalen Altimeterdienst beteiligen und ein Element in einem entsprechenden Netzwerk bereitstellen. Mit internationalen Partnern und Unterstützung einer Expertengruppe am Leibniz Rechenzentrum der TU München soll die GRID-Technologie installiert und für Dienstleistungen im Bereich der Altimetrie erprobt werden.

## 4.4 Schwerefeld

### 4.4.1 Stand der Forschung

Die neuen Satelliten-Schwerefeldmissionen „Challenging Minisatellite Payload“ (CHAMP), „Gravity Recovery and Climate Experiment“ (GRACE) und in Zukunft „Gravity and Ocean Explorer“ (GOCE) revolutionieren die Schwerefeldbestimmung. Die FGS hat direkt und indirekt an dieser Entwicklung mitgewirkt (Rummel et al., 2005). Dies betrifft sowohl die vorbereitenden Arbeiten für die Durchführung der GOCE-Mission, an der das IAPG der TU München verantwortlich mitwirkte, als auch die Validierung und Verarbeitung der Messdaten aller Missionen.

Für die GOCE-Mission betreibt das IAPG das Projektbüro Deutschland, dessen Aufgaben der Aufbau und die Koordination der wissenschaftlichen Datennutzung, die Organisation von Workshops, die Öffentlichkeitsarbeit und die Kontakte zur Industrie sind. In einem Projekt innerhalb des Geotechnologienprogramms von BMBF und DFG wird eine Auswertekette in Zusammenarbeit mit Partnerinstituten in Bonn, Hannover, Potsdam und Stuttgart aufgebaut. Daneben werden Arbeiten zur Sensoranalyse, Satellite-to-Satellite-Tracking und Satellitengradiometrie sowie zur Validation durchgeführt. Als ESA-Verträge werden die operationelle Level-1-Prozessierung der GPS- und Beschleunigungsmessdaten sowie der GPS-Teil der „Calibration Monitoring Facility“ entworfen bzw. vorbereitet. Ein weiterer ESA-Kontrakt betrifft den Aufbau der GOCE-High-Processing Facility, die für die wissenschaftliche Aufbereitung der Daten der Einzelsensoren zur präzisen Bahn- und Schwerefeldbestimmung verantwortlich ist, d.h. Vorprozessierung, geophysikalische Reduktionsmodelle, Kalibrierung etc.

Die von der bereits laufenden CHAMP-Mission gewonnenen Daten wurden zur Berechnung von Schwerefeldmodellen aus kinematischen Bahnen, d.h. einem rein geometrischen Ansatz der Satellitenbahnbestimmung aus GPS-Messungen, genutzt (Svehla und Rothacher 2005). Die Bahnen wurden in der FESG mit der Berner Software in Zusammenarbeit mit dem Astronomischen Institut der Universität Bern berechnet und mehreren Institutionen in Europa und USA zur Verfügung gestellt. In einer vergleichenden Studie wurden auch Methoden der Berechnung von Bahngeschwindigkeiten durch numerische Ableitung abgeleitet. Die erhaltenen Geschwindigkeiten werden über das Jacobi-Integral (Energieerhaltung) in Potentialdifferenzen des Erdschwerefeldes umgesetzt. Nicht-konservative Beschleunigungen werden durch numerische Integration der Modelle der zeitvariablen Gravitationsanteile (direkte, Erd- und Ozean-Gezeiten) sowie der gemessenen nicht-gravitativen Beschleunigungen reduziert. In mehreren Varianten wurden dann direkte und semianalytische Ansätze zur Schwerefeldmodellierung aus den kinematischen Bahnen erprobt. Die Validation des erhaltenen Modells geschah durch Vergleich mit unabhängigen Datensätzen (Satellitenbahnberechnungen, GPS-Nivellement, Meerestopographie). Mit der Berechnung des zeitvariablen Teils des Schwerefeldes wurde in Zusammenarbeit mit N. Sneeuw, Univ. Calgary, begonnen.

Zur Nutzung der GRACE Daten, zu denen das IAPG über die Mitgliedschaft von R. Rummel im „European GRACE Science Team“ einen eingeschränkten Zugang hat, beteiligte sich das Institut im Rahmen des Geotechnologienprogramms des BMBF und der DFG mit einem Arbeitspaket an der Simulation des kompletten Sensormodells und einem Vergleich mit Echtdaten. Als Teilsysteme wurden das dreiachsige Beschleunigungsmesssystem auf GRACE-A und B, die Lagebestimmung mit Sternsensor und Korrekturdüsen, K-Band-Messungen „line-of-sight“ zwischen den Satelliten A und B und die GPS Messungen auf beiden Satelliten untersucht, daneben auch das Gesamtsystem und die Missionsqualität.

Die Darstellung des Erdschwerefeldes geschieht im Allgemeinen mit den klassischen Methoden der Kugelfunktionsentwicklung. Bei regionalen Schwerefeldbetrachtungen, wie sie z.B. bei der Kombination mit terrestrischen Daten, die nicht in einem global einheitlichen Datum vorliegen, oder bei Untersuchungen regionaler Schwerefeldvariationen (z.B. mit GRACE Daten) erforderlich sind, bieten sich jedoch besser geeignete Methoden an. In den letzten Jahren wurde besonders die Multiskalen- bzw. Multiresolutionsentwicklung vorangetrieben. Dabei wurden als Basisfunktionen zur Erzeugung frequenzabhängiger Detailsignale harmonische sphärische Wavelet-Funktionen eingesetzt, die die Laplacesche Differentialgleichung erfüllen. Aufgrund der Lokalisierungseigenschaften dieser Wavelet-Funktionen sowohl im Raum als auch im Frequenzbereich können auch räumlich regional begrenzte Teile der Detailsignale mit hoher Approximationsgenauigkeit berechnet werden. Auf diese Weise erhält man eine „Baustein“-Darstellung des Gravitationsfeldes.

#### 4.4.2 Forschungsziele

##### **Schwerefeld-Satellitenmissionen**

Die FGS wird sich in Zukunft weiter intensiv an den Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit den Satellitenmissionen beteiligen. Bei den laufenden Missionen CHAMP und GRACE betrifft dies vor allem die Datenanalyse und die Schwerefeldbestimmung. Für die Untersuchungen der Sensordaten von GRACE (GPS high-low SST, Beschleunigungsmessung, Sternsensoren und K-Band-Messungen GRACE A-B) wurde vom IAPG ein entsprechender Antrag im Geotechnologienprogramm gestellt.

Ausgangspunkt für die Schwerefeldbestimmung aus den Messdaten der Satellitenmissionen sind die kinematisch bestimmten Satellitenbahnen. Daraus werden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Satelliten gerechnet. Nach Korrektur der durch Akzelerometer gemessenen, nicht-gravitativen Störbeschleunigungen müssen diese anschließend unter der Bedingung des Energie-Erhaltungssatz integriert und bis zur Bestimmung von Potentialkoeffizienten ausgewertet werden. Die bisherigen Schwerefeldmodelle aus GRACE Daten sind weit genauer als alle Vorgängermodelle. Dennoch bleiben sie um ein bis zwei Größenordnungen hinter dem geplanten Genauigkeitsniveau zurück. Hierfür kann es zwei Ursachen geben. Das Sensorsystem oder einzelne Sensorelemente erfüllen die Spezifikationen nicht oder die heutigen Analyseverfahren und verwendeten geophysikalischen Reduktionsmodelle (Gezeiten, feste Erde, Ozean) sind nicht in der Lage, die Datenqualität voll auszuschöpfen.

Das IAPG wird sich auf den Sensoraspekt konzentrieren, das DGFI wird an einer verbesserten Modellierung arbeiten. Bei der GRACE Mission bilden die K-Band-Messungen zwischen den beiden Satelliten, Beschleunigungsmesser, Sternsensoren und GPS zusammen ein sehr genaues Schweresensorsystem. Ziel ist es, die vollständige Vorprozessierungskette zu analysieren und zu optimieren. Die K-Band-Messungen sollen in eine Randwertaufgabe überführt werden, die über die Integration des Energieerhaltungssatzes die Bestimmung von Potentialkoeffizienten erlaubt.

Für die über verschiedene Zeitabschnitte (z.B. monatlich) berechneten Schwerefeldmodelle sind verschiedene Ansätze für die Parametrisierung der zeitlichen Änderung des Schwerefeldes zu untersuchen, wobei neben der unmittelbaren Zeitreihe von Schwerefeldmodellen auch die direkte Schätzung zeitabhängiger Potentialkoeffizienten (global und/oder regional) untersucht werden soll.

Der Start der GOCE Mission ist für die zweite Hälfte 2006 vorgesehen. Dies bedeutet, dass die Jahre 2006 und 2007 die Intensivphase für die Realisierung und wissenschaftliche Auswertung sein werden. Das IAPG

wird sich mit der gleichen Intensität wie bisher daran beteiligen. Konkret bedeutet das die Beteiligung an der Erstellung des Payload Data Systems (PDS), der Vorprozessierung (als Unterauftragnehmer der italienischen Firma ACS) der Calibration and Monitoring Facility (CMF) unter Leitung der spanischen Firma DEIMOS und der GOCE Schwerfeldmodellierung als Koordinator der Arbeiten zur High Processing Facility (HPF). Das IAPG leitet und koordiniert die Entwicklungsarbeiten eines Konsortiums, an dem zehn Institute aus sechs Ländern beteiligt sind. Ziel des HPF (Level2-Processing) ist die Berechnung von Präzisionsbahnen aus GPS-Beobachtungen, die Datenanalyse und externe Kalibration der Gravitationsgradienten und die Erstellung von hochauflösenden Schwerfeldmodellen. Dem Konsortium wurde im Sommer 2004 der Auftrag erteilt mit einer Laufzeit von maximal sechs Jahren.

### **Terrestrische Gravimetrie**

Das BKG sichert auch in Zukunft mit seinen Stationen Wettzell und Bad Homburg den nationalen Schwerestandard. Über die internationalen Vergleichskampagnen am BIPM wird die deutsche Schwerereferenz in das internationale System der Einheiten (SI) langfristig eingebunden.

Durch die Verbindung der wiederholten absoluten Schweremessungen und der kontinuierlichen Aufzeichnungen der Schwerevariationen ist es möglich, die instrumentelle Nullpunktdrift des Supraleitenden Gravimeters von geophysikalischen Signalen zu trennen. Weiterhin wird hierdurch auch ein Beitrag zur Kalibrierung des Supraleitenden Gravimeters geleistet. Die Gravimetrie ermöglicht eine von den geometrischen Messverfahren vollständig unabhängige Überwachung der Höhenreferenz. Dies ist vor allem wichtig als Langzeitbezug zur Beurteilung von großräumig wirkenden Umweltbeeinflussungen.

Die Kombination der Absolutschweremessungen mit den Beobachtungen supraleitender Gravimeter in ausgewählten Stationen eignet sich insbesondere zur Untersuchung der zeitlichen Änderungen und zur Entwicklung von Korrektionsmodellen für die geophysikalischen Fluide.

Abbildung 4.5 zeigt eine vorläufige Kombination der Messdaten des Supraleitenden Gravimeters mit den wiederholten Absolutschweremessungen auf der Station Wettzell, nachdem Korrekturen für den lokalen Grundwasserstand an die Schweremessungen angebracht wurden.

### **Darstellungsformen des Erdschwerfeldes**

Mit Entwicklungsgraden von 200 bis 250 in den Kugelfunktionsreihen werden die neuen Schwerfeldmissionen CHAMP, GRACE und GOCE erhebliche Verbesserungen für die lang- bis mittelwelligen Strukturen des Erdschwerfeldes ermöglichen. Die Kombination der reinen Satellitenlösungen zur Darstellung des Erdschwerfeldes mit hochauflösender Schwereinformation, die an bzw. nahe der Erdoberfläche in Form von Schwereanomalien vorliegt oder durch Fluggravimetrie gewonnen wird, wirft theoretische und numerische Fragestellungen auf, die untersucht werden sollen.

Als Grundlage der zukünftigen Darstellung des Erdschwerfeldes wird eine „Baustein“-Kombination angesehen, d.h. die Verbindung von Reihenentwicklungen in globalen und regionalen Modellen. Die Verknüpfung räumlich benachbarter Bausteine erfordert die Einführung von Randzonen, in denen die Reihenkoeffizienten aus den Beobachtungen beider Regionen geschätzt werden müssen. Hierzu sollen geeignete effiziente Methoden entwickelt werden. Die Verbindung von Bausteinen der gleichen Region, aber verschiedener Skalen lässt sich durch die pyramidale Struktur erreichen, weil die Reihenkoeffizienten verschiedener Skalen linear miteinander verknüpft sind. Die Berechnung der Reihenkoeffizienten erfolgt bislang durch eine Schätzung nach der Methode der kleinsten

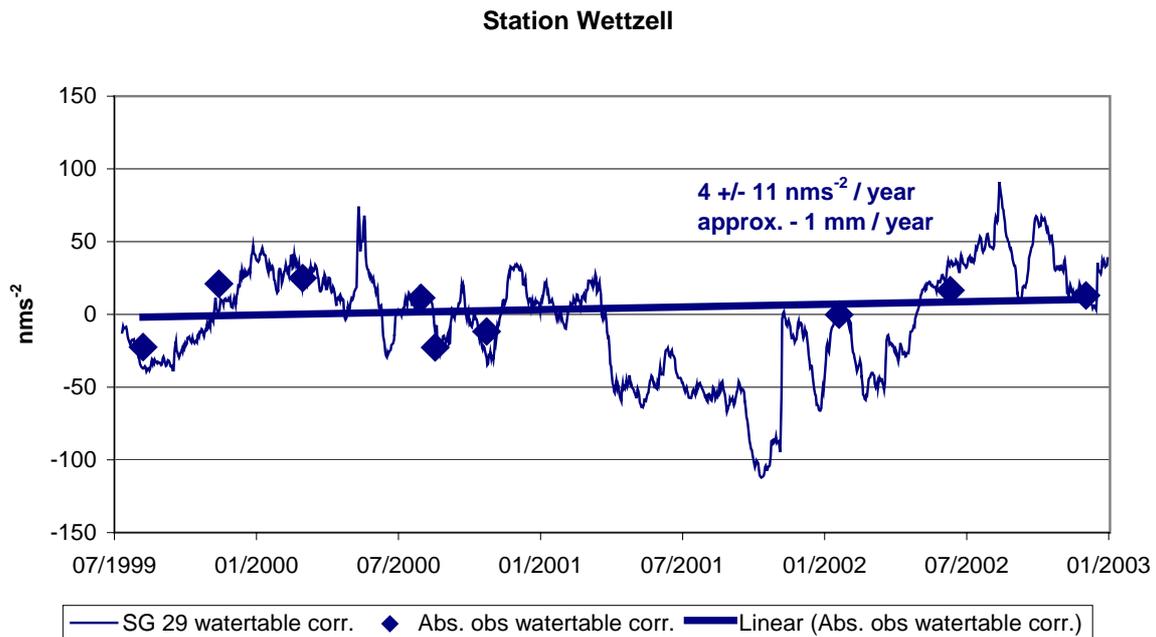


Abbildung. 4.5: Schwereänderungen Wettzell aus kontinuierlichen Supraleiterregistrierungen und wiederholten Absolutschweremessungen, Grundwasserkorrekturen angebracht, mittlere Schwereänderung  $4 \pm 11 \text{ nms}^{-2} / \text{Jahr}$

Quadrate sowie eine Bayes-Schätzung. Als weiteres Verfahren soll auch die „Least Squares Collocation“ eingesetzt werden.

Obwohl sich die räumliche Auflösung der neuen Schwerefeldmodelle erheblich verbessern wird, bleibt die notwendige „Fortsetzung nach unten“ als Aufgabe bestehen: die Satellitenmessungen erfolgen in Flughöhe, das Schwerefeld soll jedoch bis an die Erdoberfläche bestimmt werden. Dabei besteht die Gefahr, dass z.B. Schwereanomalien durch Bezug auf inkonsistente Höhensysteme systematische Fehler aufweisen. Es ist deshalb zu untersuchen, ob Schwerefelddaten der Erdoberfläche mit den langwelligen Strukturen der Satellitenlösungen des Schwerefeldes kompatibel sind, in welchem Umfang zusätzliche Schwerefeldbeobachtungen an bzw. nahe der Erdoberfläche die Normalgleichungen der Satellitenlösungen stabilisieren können und ob und wie weit der Entwicklungsgrad der Schwerefeldmodelle durch Schweredaten von der Erdoberfläche erhöht werden kann.

## 4.5 Kombinierte Verfahren

### 4.5.1 Stand der Forschung

Die Kombination der geometrischen und gravimetrischen Verfahren der Geodäsie geschieht heute überwiegend indirekt, d.h. nicht durch gemeinsame Schätzung von Parametern sondern durch Nutzung von bereits verarbeiteten Daten des jeweils anderen Verfahrens. So werden z.B. bei den geometrischen Verfahren im Allgemeinen unveränderliche Erdschwerefeldmodelle benutzt und bei Satellitenbahnbestimmungen für die Schwerefeldbestimmung werden die Stationskoordinaten aus den geometrischen Verfahren übernommen.

Eine klassische Kombination von geometrischen und gravimetrischen Daten sind die physikalischen Höhensysteme. Nationale Höhen werden in ihrem Niveau durch langjährige Mittel von Pegelregistrierungen definiert. Solch ein mittlerer Meeresspiegel fällt jedoch nicht mit einer globalen Bezugsfläche des Erdschwerefeldes, z.B. dem Geoid oder dem Qua-

sigeoid, zusammen, so dass widersprüchliche Höhen an Landesgrenzen auftreten und Höhensysteme auf verschiedenen Kontinenten keine gemeinsame Höhenbezugsfläche besitzen. Der mittlere Meeresspiegel ändert sich außerdem mit der Zeit, und die Pegel selbst können vertikale Erdkrustenbewegungen erfahren, die eine scheinbare Änderung des Meeresspiegels vortäuschen, so dass auch der Zeitpunkt der Definition entscheidend für das Niveau des Höhensystems ist. Die FGS hat sich in den letzten Jahren intensiv an den Arbeiten zur Vereinheitlichung der Höhen- und Schweresysteme, insbesondere in Europa (BKG) und Südamerika (DGFI) beteiligt (Drewes et al., 2002, Ihde and Sanchez, 2005). Das Deutsche Referenznetz GREF wird zu einem integrierten Referenznetz ausgebaut, auf dessen Stationen GNSS-, Schwere- und im Küstenbereich Pegelbeobachtungen ausgeführt werden. Mehrere GREF - Stationen sind in verschiedene internationale Referenznetze eingebunden: IGS, TIGA, ECGN, ESEAS, (Abb. 4.6).

In der Geodynamikforschung werden die Bewegungen von Massen im Erdkern, im Mantel und der Erdkruste sowie die verursachenden Kräfte untersucht. In der Geodäsie beschränkt man sich dabei überwiegend auf

## GREF Network

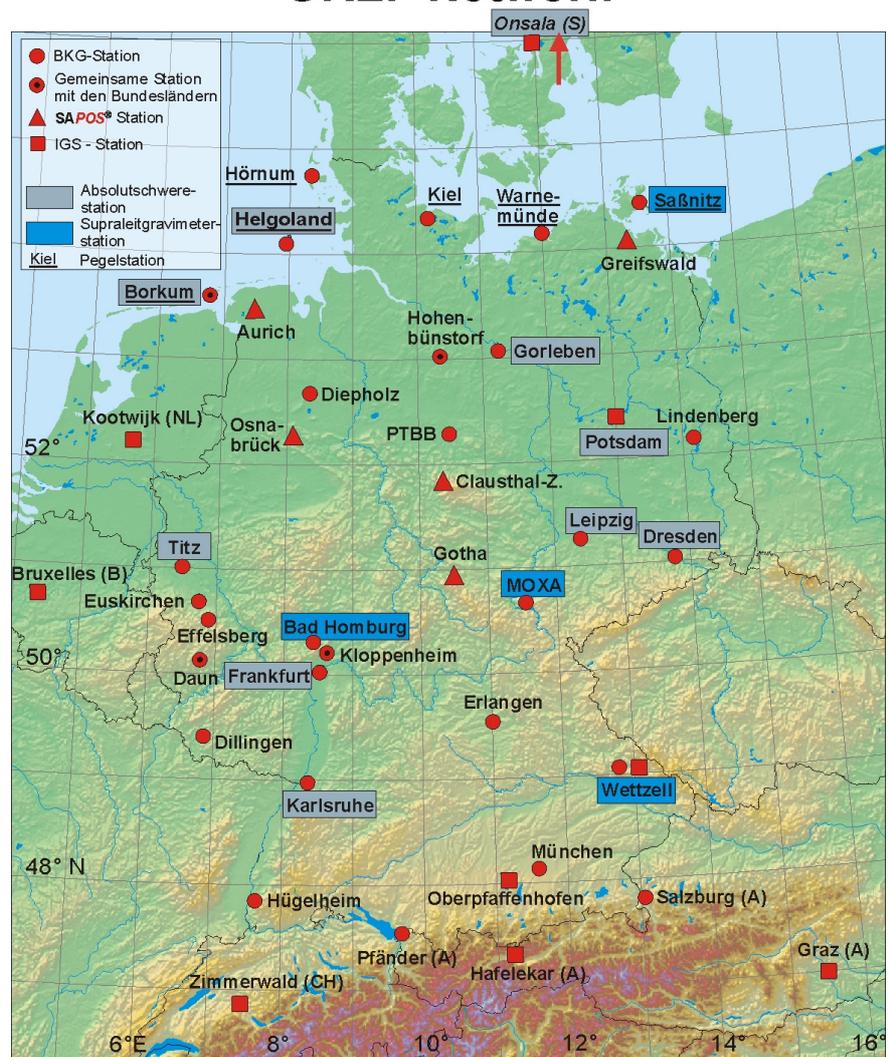


Abbildung 4.6: Das im Aufbau befindliche integrierte deutsche Referenznetz GREF

die Kinematik, d.h. die Kräfte bleiben unberücksichtigt. In der Geophysik werden Modelle der Massenverlagerungen, z.B. durch Konvektion und Subduktion, erstellt, deren Auswirkung auf die Bewegungen der Erdoberfläche nur zur späteren Validierung untersucht werden. Gemeinsam erforschen Geodäten, Geophysiker, Meteorologen und Ozeanographen die Auswirkung von Massenverlagerungen, vor allem in der Atmosphäre und Hydrosphäre (einschließlich Ozeane und Eisflächen), auf die Erdrotation. Konsistente Modelle, welche die Auswirkungen sämtlicher Massenverlagerungen (feste, flüssige und gasförmige Komponenten des Systems Erde) auf alle messbaren geodätischen Größen (Erdoberflächendehformationen, Meeresspiegelvariationen, Erdrotationsschwankungen, Schwerefeldänderungen) einschließen, gibt es heute nicht. Diese Thematik wurde in der Koordinierungsgruppe für einen DFG-Schwerpunkt „Massentransporte im System Erde“ diskutiert, an der sich die FGS maßgeblich beteiligt hat (Ilk et al., 2005).

Auch die Modelle für die Erforschung des globalen Wandels, insbesondere der Klimaveränderungen, benutzen kaum kombinierte Verfahren. So werden Werte für den Meeresspiegelanstieg oft ausschließlich aus Pegelregistrierungen abgeleitet, die durch vertikale Pegelbewegungen verfälscht sein können. Das Abschmelzen der Polkappen wird aus Eismassenänderungen gerechnet, die keine globale Bilanz enthalten. Meeresspiegelvariationen aus Satellitenaltimetrie müssen zur Aussage über Massentransporte wegen der Ausdehnung aufgrund von Temperaturänderungen (sterischer Effekt) korrigiert werden.

Innerhalb der FGS wurde in jüngster Zeit ein dynamische Erdsystemmodell (DyMEG) erstellt, das die Erfassung einer Vielzahl von Einflussfaktoren aus der Atmosphäre, den Ozeanen und der festen Erde zur Modellierung der geodätisch messbaren Auswirkungen als Deformation der Erdoberfläche, Erdrotationsschwankungen und globalen Schwerefeldvariationen erlaubt (Seitz 2004). Dieses Modell soll in den nächsten Jahren verfeinert werden.

## 4.5.2 Forschungsziele

### Höhensysteme

Die Realisierung eines einheitlichen globalen Höhenbezugssystems ist eine wesentliche Voraussetzung, homogene terrestrische gravimetrische Daten mit den globalen Schwerefeldmodellen der Satellitenschwerefeldmissionen zu kombinieren. Andererseits werden die Satellitenschwerefeldmissionen GRACE und GOCE einen grundlegenden Fortschritt bei der Vereinigung der Höhensysteme bringen.

Zur weltweiten Vereinheitlichung der Höhensysteme ist die Kenntnis der Meerestopographie (der Abweichung zwischen Geoid und Meeresspiegel) zum Zeitpunkt der Definition der nationalen Höhensysteme erforderlich, oder es muss mit direkten (durch Nivellement) oder indirekten (mit GPS und Geoidbestimmung) Verbindungen zwischen einzelnen Höhensystemen die Differenz in deren Niveau bestimmt werden. Die Satellitenaltimetrie kann prinzipiell den mittleren Meeresspiegel in einem geozentrischen System darstellen. Die altimetrische Bestimmung von Meereshöhen im Küstenbereich ist aber problematisch, weil das Radarsignal durch Landflächen gestört wird und sich atmosphärische Laufzeitkorrekturen gerade im Küstenbereich stark ändern. Außerdem ist auch das Geoid im Küstenbereich nicht hinreichend genau bekannt. Nivellements stehen nicht weltweit zur Verfügung und die punktuelle Geoidbestimmung an GPS-Stationen ist noch zu ungenau. Folgende Arbeiten sind geplant:

- Der Potentialwert  $W_0$ , der eine Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes als globale Höhenbezugsfläche festlegt, soll aus der durch Altimetrie bestimmten Meeresoberfläche und den Potenzialwerten auf dieser Oberfläche aus einem Schwerefeldmodell berechnet werden.

Die Abhängigkeit vom Schwerefeldmodell und seinen Fehlern sowie die Relation zu einem mittleren Meeresspiegel, zu dessen geographischer Ausdehnung, Darstellungsform und zeitlicher Änderung sind zu untersuchen.

- Ellipsoidische Meereshöhen sollen zwischen verschiedenen Küstenpegeln durch Altimetrie und/oder GPS sowie Vergleich mit Pegelregistrierungen übertragen werden. Verbesserungen der altimetrischen Korrekturen für Gezeiten und atmosphärische Einflüsse sind dafür erforderlich. Die Methode der Höhenübertragung muss optimiert werden.
- An ausgewählten Küstenpegeln kann das Geoid bzw. Quasigeoid durch Kombination von CHAMP-, GRACE- (später auch GOCE-) Schwerefeldmodellen und SchwereDaten der Erdoberfläche (Anomalien, Potentialdifferenzen, Schweregradienten, Fluggravimetrie) bestimmt und mit den festgelegten Werten des Höhensystems verglichen werden. Die Meerestopographie und ihre Kinematik im Küstenbereich ist dann zu modellieren, um einen Vergleich mit dem Zeitpunkt der Definition des Höhensystems zu erhalten.
- Die nivellitische Höhenübertragungen zwischen Pegeln bzw. Punkten benachbarter Höhensysteme mit gravimetrischer Reduktion führt zu einer Verbindung der Höhensysteme. Durch präzise Geoidbestimmung an Referenzpunkten verschiedener Höhensysteme mit genauen ellipsoidischen Höhen aus GPS ist eine weitere Verbindung herzustellen.
- Die Datumskorrekturen für die einzelnen Höhensysteme auf ein globales System können aus Altimetrie, GPS, Nivellement und Geoidbestimmung durch Ausgleichung der Ergebnisse aller Methoden erzielt werden.
- Referenznetze höchster Genauigkeitsstufe, mit denen die verschiedenen Messverfahren miteinander verknüpft sind, werden mit dem GREF (German Reference Frame) für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland sowie in Zusammenarbeit mit anderen europäischen Institutionen mit dem ECGN (European Combined Geodetic Network) in den nächsten Jahren unter maßgeblicher Beteiligung des BKG realisiert. Damit können auf den Stationen die Zeitreihen der geometrischen und gravimetrischen Messungen zur Überwachung der Höhenkomponente kombiniert werden.

### **Dynamisches Erdsystemmodell**

Die Massenverlagerungen innerhalb und zwischen den einzelnen Komponenten des Systems Erde beeinflussen die Orientierung, das Schwerefeld und die Geometrie der Erde. Die größten Effekte verursachen die Atmosphäre, die Ozeane und die Deformationen des festen Erdkörpers infolge von Gezeiten und Auflasten. Massenverlagerungen einzelner Komponenten können zwar durch Zeitreihen von Luftdruck, Niederschlag, Verdunstung usw. modelliert werden; die Kenntnis dieser Parameter ist jedoch unvollständig, unterschiedlich genau und nicht konsistent. Die genannten Auswirkungen lassen sich dagegen durch geodätische Raumverfahren sehr genau messen.

Das innerhalb der FGS entwickelte nicht-lineare dynamische Erdsystemmodell DyMEG wird durch atmosphärische und ozeanische Drehimpuls- und Bodendruckvariationen angetrieben. Auch Gezeiten und lunisolare Drehmomente werden berücksichtigt. Die Potentialkoeffizienten zweiten Grades der Kugelfunktionsentwicklung des Schwerefeldes stehen über den Trägheitstensor in Zusammenhang mit der Erdrotation. Bisherige Analysen mit DyMEG, die auf die Koeffizienten zweiten Grades beschränkt waren, sollen auf weitere niedere Koeffizienten ausgedehnt werden. Zeitliche Variationen dieser Koeffizienten, die aus Beobachtun-

gen der neuen Schwerefeldmissionen CHAMP und GRACE bestimmt werden, lassen Rückschlüsse auf die Massenverlagerungen zu, die von Modellsimulationen unabhängig sind. Die abgeleiteten Tensorvariationen können Lücken in der Drehimpulsbilanz schließen, die aufgrund unzureichend modellierter Subsysteme (z.B. kontinentale Hydrosphäre) bestehen.

Die vor allem von GRACE zu erwartenden zeitlichen Variationen der Potentialkoeffizienten (höheren Grades) sollen den „vorwärts“ modellierten Massenverlagerungen gegenübergestellt werden (Bilanzierung). Hierbei werden empirische Orthogonalfunktionen (EOF) eingesetzt, die – besser als Kugelfunktionen – die dominanten zeitlichen Variationen von lückenhaft vorliegenden Parameterdaten analysieren können. Durch Unterschiede der räumlichen und zeitlichen Variationen sowie eine Fehlerbeurteilung einzelner Komponenten sollen unzureichend modellierte Komponenten identifiziert und eventuell verbessert werden. Um Auswirkungen von Deformationen (insbesondere durch Auflasten) auf Erdrotation und Schwerefeld besser modellieren zu können, sollen geometrische und physikalische Deformationen des Erdkörpers durch die Finite-Elemente Methode (FEM) beschrieben werden.

## 4.6 Tabellarische Zusammenfassung der Ziele

### Geodätische Punktfelder

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Präzise Punktpositionierung	Physikalische Modellierung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ionosphäre</li> <li>• Troposphäre</li> </ul> Auflasteffekte <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ozeane</li> <li>• Atmosphäre</li> </ul> Kombination der Techniken	Parameterschätzung für <ul style="list-style-type: none"> <li>• die Elektronendichtemodelle</li> <li>• die Azimutabhängigkeit</li> </ul> Verbesserte Modelle für <ul style="list-style-type: none"> <li>• bestimmte Regionen</li> <li>• Luftdruck-Deformation</li> </ul> Konsistente Modellierung
Referenzsysteme	Stabile Datumsfestlegung (Ursprung, Orientierung, Maßstab)  Konsistenz der Parameter und Referenzsysteme  Verknüpfung der Techniken (Lokale Verbindungen)	Ausschöpfung der spezifischen Eigenschaften der Beobachtungstechniken  Rigorose Kombination verschiedener Referenzsysteme  Verbesserung der lokalen Messungen, gezielte Auswahl
Echtzeitnahe Parameter	Schnellere Verfügbarkeit der VLBI-Ergebnisse  Echtzeitnahe Bestimmung der Erdrotationsparameter  Echtzeitnahe Positionierung	Entwicklung der eVLBI  Verknüpfung hochfrequenter Laserkreismessungen mit VLBI- und GPS-Messungen  Entwicklung von Komponenten für globale, regionale GNSS-Real-Time-Positionierung

### Orientierung und Rotation der Erde

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Neues IAU Präzessions- und Nutationsmodell	Realisierung des neuen Modells zur Erdrotation  Implementierung der neuen Transformationsparameter	Erforschung einer geeigneten Parametrisierung  Entwicklung geeigneter Algorithmen für die Software
Polbewegung und UT1	Steigerung der Genauigkeit und der Auflösung der EOP  Konsistente Bestimmung der EOP durch Kombination der Beobachtungsverfahren  Konsistente Bestimmung von CRS, TRS und EOP  Aufdeckung der Zusammenhänge zwischen Erdsystemprozessen und EOP	Verbesserte Refraktionsmodellierung, tägliche VLBI  Unverzerrte Kombination der Messdaten verschiedener Beobachtungsverfahren  Simultane Ausgleichung von CRF, TRF und EOP  Modellbildung und Vergleich der EOP/ERP aus physikalischen Modellen

### Meeresoberfläche

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Kinematisches Modell der Meeresoberfläche	Synergien durch relative Kalibration verschiedener Altimetermissionen;  Beschreibung des Meeresspiegels für beliebige Zeitpunkte, Perioden oder Jahreszeiten	Diskrete Kreuzungspunktanalyse; Schätzung von Korrekturmodellen des „sea state bias“;  Schätzung saisonaler und aperiodischer Signale durch harmonische Analyse und Empirische Orthogonalfunktionen
Analyse und Nutzung mariner Schweredaten	Stabilisierung der „downward continuation“; höhere räumliche Auflösung des Schwerefeldes	„Least Squares“, iterative Lösungsverfahren
Entwicklung eines „International Altimeter Service“	Verbesserte Dokumentation und Bereitstellung von Erderkundungsdaten mit wichtigen geophysikalischen Anwendungen	Organisation und Aufbau von Web-Diensten; GRID-Technologie

### Schwerefeld

Thema	Forschungsziele	Methodik und Verfahren
Schwerefeldmissionen CHAMP und GRACE	Analyse der Sensoren  Schwerefeldmodellierung	K-Band-Messungen, Beschleunigungsmesser, Sternsensoren, GPS  Energieerhaltung aus kinematischen Bahnen
Schwerefeldmission GOCE	Payload Data Systems (PDS) Calibration and Monitoring Facility (CMF) High Processing Facility (HPF)	Erstellung des Systems Daten-Vorprozessierung  Präzise Bahnen, Schwerefeldmodelle
Terrestrische Schwere-messungen	Sicherung der Schwerereferenz	Kombination von Absolut- mit Supraleit-Gravimeter-Messung
Darstellungsformen des Erdschwerefeldes	Baustein-Kombination globaler und regionaler Darstellungen	Multiskalen- bzw. Multiresolutionsentwicklung (Wavelets, Splines, Kollokation etc.)

**Kombinierte Verfahren**

<b>Thema</b>	<b>Forschungsziele</b>	<b>Methodik und Verfahren</b>
Höhensysteme	<p>Potenzialwert <math>W_0</math></p> <p>Niveau der Pegelregistrierungen</p> <p>Geoid an Höhenreferenzpunkten</p> <p>Kombinierte Referenzsysteme</p>	<p>Integration der altimetrisch bestimmten Meereshöhen</p> <p>Kombination Altimetrie, GPS und Pegelregistrierungen</p> <p>Kombination Satellitenmissionen und terrestrische Schwere</p> <p>Kombination geometrischer und gravimetrischer Netze</p>
Erdsystemmodell	<p>Drehimpulsbilanz</p> <p>Dynamische Deformationseffekte</p> <p>Massentransportbilanz</p>	<p>Physikalische Modellierung der atmosphärischen und ozeanischen Massenverlagerungen</p> <p>Dynamische Modellierung des Einflusses von Deformationen auf Erdrotation und Schwere</p> <p>Integration aller Massenverlagerungen und ihrer Auswirkungen auf Erdrotation und Schwere</p>

## 5 Verbindung mit Erdwissenschaften

Durch präzise geodätische Raumverfahren werden zahlreiche Zustandgrößen geophysikalischer Prozesse und ihre zeitlichen Veränderungen erfasst. Präzise Messungen und theoretische Modellbildung stehen in enger Wechselwirkung. Einerseits können gemessene Zustandgrößen mathematische und physikalische Modelle geophysikalischer Prozesse validieren, andererseits führen die extrem hohen Genauigkeiten der geodätischen Raumverfahren häufig auf unbekannte Signalstrukturen – daraus leiten sich Anforderungen für eine erweiterte Modellbildung ab.

Ein erweitertes Verständnis der Prozesse im System Erde erfordert einen intensiven Austausch mit anderen geowissenschaftlichen Disziplinen und ist häufig nur durch die Synergien verschiedener Messverfahren möglich. Zwei größere DFG-Gemeinschaftsprojekte, an denen die Mitglieder der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie maßgeblich beteiligt sind, erfordern diese engen Verbindungen mit anderen Erdwissenschaften und werden Synergien verschiedener Messverfahren bilden:

- Schwerpunkt „Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde“
- Forschergruppe „Erdrotation und globale dynamische Prozesse“

Der Schwerpunkt wurde im Dezember 2004 (im zweiten Anlauf) beantragt und ist im Mai 2005 vom Senat der DFG genehmigt worden. Die Forschergruppe „Erdrotation“ ist nach positiver Vorbegutachtung auch in der Hauptbegutachtung erfolgreich gewesen und soll in nächster Zeit dem Senat der DFG zur Förderung empfohlen werden. Es kann erwartet werden, dass sowohl das Schwerpunkt-Programm als auch die Forschergruppe im Laufe des Jahres 2006 ihre Untersuchungen aufnehmen können.

### 5.1 Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde

Der Schwerpunkt wird Ursachen und Wirkungen räumlicher und zeitlicher Massenvariationen aus neuartigen Beobachtungen von Schwerefeldänderungen und Oberflächendeformationen untersuchen.

Die Daten gleichzeitig messender Schwerefeld- und Altimetersatelliten, ausgestattet mit neuartigen, hochgenauen Sensoren, sollen dabei ge-

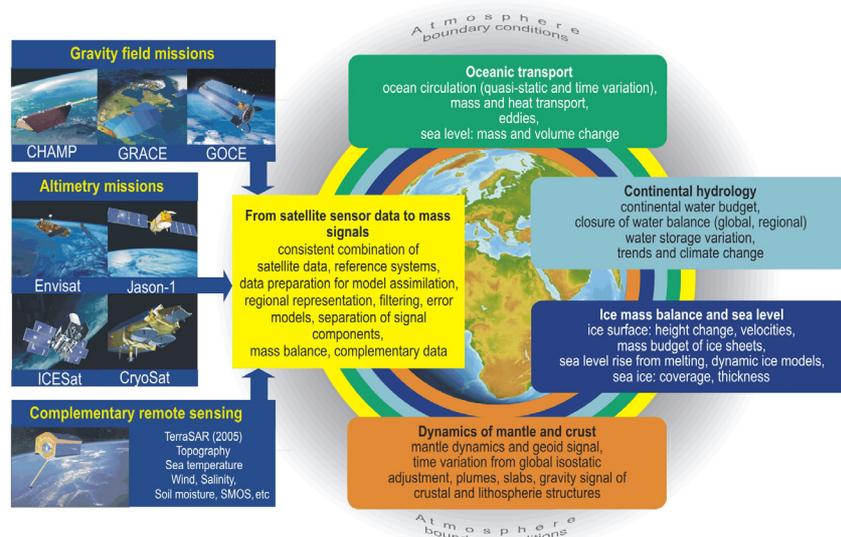


Abbildung 5.1: Auswertung von Schwerefeld- und Altimetermissionen für die Untersuchung von Massentransporten und Massenverteilungen (Quelle: Ilk et al., 2005)

nutzt werden, um die Massenveränderungen im System Erde durch deren Effekt auf das Schwerfeld und auf die Geometrie der Ozean- und Eisoberflächen direkt zu erfassen, deren physikalische Ursachen zu studieren und damit eine solide Grundlage für Vorhersagen zu schaffen (Abb. 5.1). Die derzeitige Konstellation der gleichzeitig realisierten Raumverfahren für Schwere und Oberflächengeometrie (CHAMP, GRACE und GOCE einerseits sowie ENVISAT, Jason1, ICESat und CryoSat andererseits) ist einmalig. Zu den satellitengestützten Daten gibt es kein terrestrisches Äquivalent.

Es wird erwartet, dass durch die Forschungsarbeiten des Schwerpunktes

- erstmals die Modellierung von absoluten Transporten im Ozean möglich wird,
- Veränderungen der kontinentalen hydrologischen Speicher erstmals großräumig beobachtet werden und somit globale und regionale Wasserbilanzen geschlossen werden können,
- Änderungen der polaren Eisbedeckung und ihre Wechselwirkung mit dem globalen Meeresspiegel erkannt werden können
- und sich bisher nicht detektierbare Massenverlagerungen im Erdinnern ableiten lassen.

Diese Erkenntnisse haben direkte Bedeutung für zukünftige Klimaprognosen und die Möglichkeit, den lebenswichtigen Wasserkreislauf im System Erde zu verstehen.

Mitglieder der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie waren maßgeblich an der Formulierung des Schwerpunktes beteiligt. Sie bringen durch ihre Vorarbeiten eine hoch entwickelte Expertise auf den Gebieten der Schwerfeldbestimmung und der Satellitenaltimetrie ein und werden das Arbeitsprogramm des Schwerpunktes mittragen. Insbesondere die grundlegende Aufbereitung von Massen- und Geometriesignalen aus den äußerst präzisen, über verschiedene Satellitenplattformen verteilten Sensorsystemen werden durch die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie einzubringen sein. Die FGS wird damit wesentliche geodätische Grundlagen für die in Abbildung 5.2 dargestellte Vernetzung der Forschungsthemen bereitstellen. Tabelle 5.1 führt Themen des Schwerpunktprogramms auf (Teilprojekte sind noch nicht definiert) und indiziert notwendige Verbindungen mit anderen Geowissenschaften.

Tabelle 5.1: Interdisziplinäre Themen im Schwerpunktprogramm „Massentransporte und Massenverteilung im System Erde“ mit den Verbindungen zu anderen Geowissenschaften.

Forschungsthema	Geowissenschaften
Absolute Massen- und Wärmetransporte im Ozean und deren zeitliche Änderungen	Ozeanographie
Zeitliche Änderungen von großräumigen kontinentalen Wasserspeichern und den zugehörigen Wassertransporten	Hydrologie
Massenbilanz kontinentaler Eisschilde (Antarktis, Grönland)	Glaziologie
Globale und regionale Änderungen des mittleren Meeresspiegels	Ozeanographie, Hydrologie
Statische und zeitabhängige Dynamik des Erdinnern (Manteldynamik)	Geophysik
Oberflächenprozesse und Struktur der Lithosphäre	Geophysik

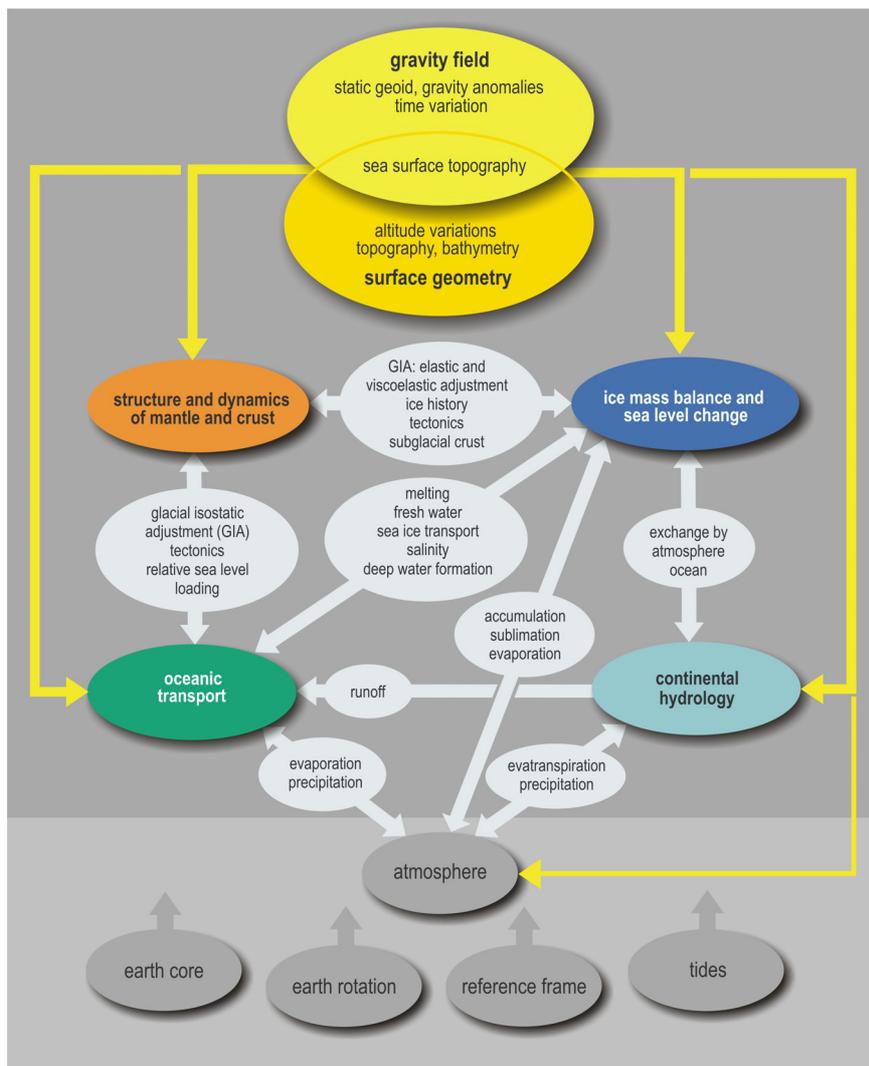


Abbildung 5.2: Vernetzung der Forschungsthemen des Schwerpunkt-Programms durch die Massenaustauschbeziehungen zwischen verschiedenen Komponenten des Systems Erde. Die im unteren Teil dargestellten Wirkungselemente sind Schnittstellen zu anderen Forschungsschwerpunkten (Quelle: Ilk, et al., 2005).

In dem Schwerpunkt „Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde“ müssen aber auch zahlreiche Daten und Informationen von anderen Geowissenschaften bereitgestellt, aufbereitet und analysiert werden. So erfordern z.B. die „Vorwärtsmodellierungen“ der Massensignale geophysikalischer Fluide, Ergebnisse numerischer Modelle der Ozeanographie (für den sterischen Effekt), Daten von Meteorologischen Diensten (Niederschlag, Wasserdampfgehalt, Luftdruck), der Hydrologie (Oberflächenabflüsse, Grundwasserschwankungen, Variationen der Bodenfeuchte ) und der Cryosphäre (Schneebedeckung, Eisakkumulation). Eine abschließende Massen-Bilanzierung des globalen Wasserkreislaufs durch Gegenüberstellung von gemessenen Schwerfeldvariationen und modellierten Massenvariationen, verspricht eine bessere Trennung aller beteiligten Signale und erfordert die engste Kooperation aller beteiligten Geowissenschaften.

## 5.2 Erdrotation

Eine weitere Verbindung zwischen den Arbeiten der FGS und den anderen Erdwissenschaften wird über die Modellierung der Erdrotation und die Interpretation von Erdrotationsparametern geschaffen. Dazu ist die FGS mit mehreren Teilanträgen in einen Antrag für eine DFG-Forscherguppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse" eingebunden. Die Vorbegutachtung wurde positiv beschieden, nach erfolgreichem Hauptverfahren soll die Forschergruppe demnächst dem Senat der DFG zur Förderung empfohlen werden.

Die Thematik der Anträge befasst sich mit allen Aspekten der Erdrotationsforschung von den Beobachtungen bis zur Interpretation. Insbesondere bei der Modellierung und der Interpretation kommt die enge Wechselwirkung mit den anderen Erdwissenschaften zum Tragen. Die Parameter der Erdrotation (EOP) stellen nicht nur die Verbindung zwischen den terrestrischen und inertialen Referenzsystemen her, vielmehr sind ihre Variationen globale und integrale Indikatoren globaler dynamischer Prozesse wie z.B. für Massenbewegungen in der Atmosphäre und der Hydrosphäre. Die wichtigsten Zusammenhänge sind im Überblick in Abbildung 5.3 wiedergegeben. Klar zu erkennen ist die Vielzahl an relevanten dynamischen Prozessen mit direkten und indirekten Auswirkungen auf die Parameter der Erdrotation. Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Prozessen sind in der Regel hochkomplexe, nichtlineare Phänomene. Die Deformationen des geometrischen Erdkörpers und das Erdschwerefeld mit seinen zeitlichen Variationen werden in der Geodäsie unabhängig bestimmt und stehen mit den EOP in Verbindung. Da die Parameter der Rotation, der Geometrie und des Schwerefeldes der Erde unterschiedlich sensitiv sind in Bezug auf die ursächlichen Vorgänge im Sys-

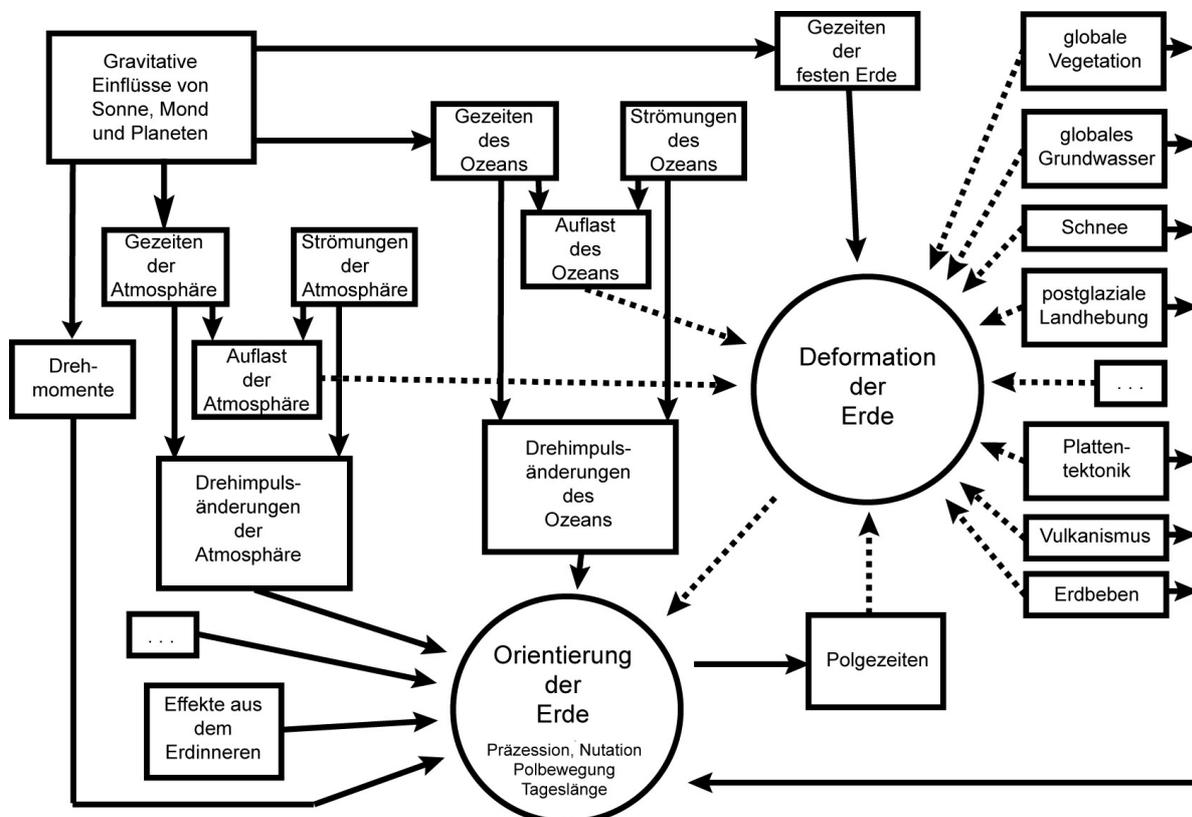


Abbildung 5.3: Komponenten und Einflüsse im System Erde mit Relevanz für die Erdrotation (Quelle: Schuh et al., 2003). Direkte Einflüsse dynamischer Prozesse auf die Erdrotation sind durchgezogen dargestellt, indirekte Einflüsse, die sich über die Deformation der Erde auswirken, gestrichelt.

tem Erde, können diese zumindest teilweise separiert werden, wenn genügend unabhängige Informationen zur Verfügung stehen. Die Zusammenhänge zwischen den Beobachtungsverfahren, den geodätischen Parametergruppen und den Komponenten im System Erde sind schematisch in Abbildung 5.4 dargestellt.

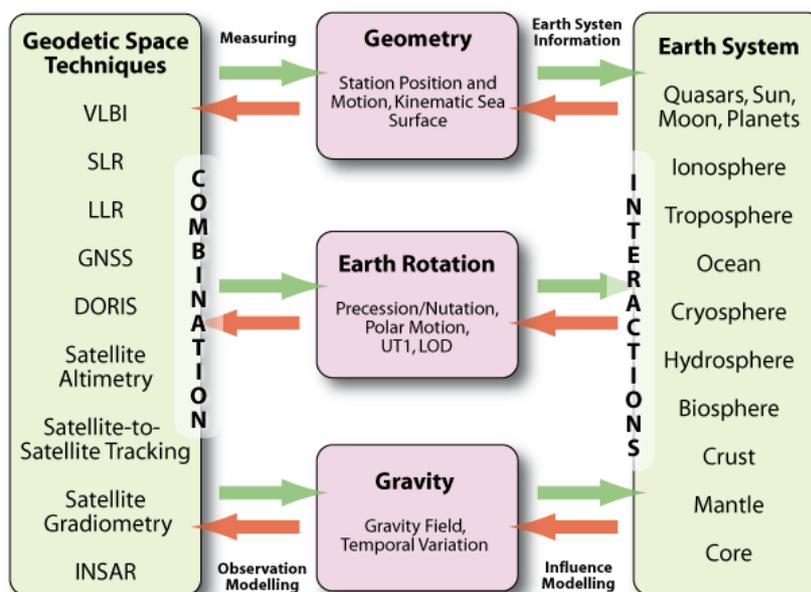


Abbildung 5.4: Geodätische Parametergruppen (Mitte) und ihre Zusammenhänge mit den geodätischen Raumverfahren (links) und den Komponenten des Systems Erde (rechts)..

Von den geplanten Arbeiten im Rahmen dieser Forschergruppe wird erwartet, dass sie zuallererst Daten mit einer homogen hohen Qualität liefern werden. Die vergleichende Analyse sowie die Kombination verschiedenartiger Daten soll die Konsistenz der Ergebnisse deutlich verbessern. Insbesondere soll es im Rahmen der Forschergruppe erstmals möglich werden, Erdrotations-, Geometrie- und Schwerefelddaten konsistent zu bestimmen und zu beschreiben. Die Bedeutung dieser geplanten Arbeiten zur Erdrotationsforschung reicht damit auch in die Nachbardisziplinen hinein, so dass Verbesserungen bei der Modellierung sowohl der einzelnen Subsysteme des Systems Erde (Hydrosphäre, Atmosphäre, ...) als auch bei der Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen diesen erwartet werden können. Die Verknüpfungen zu anderen Geowissenschaften ergeben sich durch das Antragskonzept im Allgemeinen und durch folgende Einzelprojekte im Besonderen (Tab. 5.2):

Tabelle 5.2: Verbindungen der FGS über Teilprojekte der Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse" zu anderen Geowissenschaften

Teilprojekt	Geowissenschaften
Entwicklung eines Erdrotations-Informationssystems (ERIS)	Ozeanographie, Meteorologie
Erdrotation und ozeanische Zirkulation	Ozeanographie
Massenbewegungen im Erdkern und -mantel und ihr Einfluss auf die Polbewegung und das Schwerefeld	Geophysik, Geodynamik
Modellierung episodisch-transienter Signale in Messungen großer Ringlaser	Geophysik, Geodynamik
Untersuchung subtäglicher und episodischer Variationen der Erdrotation	Ozeanographie, Meteorologie
Langfristige EOP-Reihen als unabhängiger globaler Klimaindikator	Ozeanographie, Meteorologie

## 6 Deutsche Beteiligung an den internationalen Diensten IERS, IGS, ILRS, IVS

Internationaler Dienst	Deutsche Institutionen
<b>International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)</b>	
Analyse-Koordinator	GeoForschungsZentrum Potsdam
Zentralbüro und Datenbank	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
ITRF Combination Centre	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Combination Research Centre	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG), Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG), Technische Universität München GeoForschungsZentrum Potsdam Geodätisches Institut der Universität Bonn
<b>International GNSS Service (IGS)</b>	
Analysezentrum	GeoForschungsZentrum, Potsdam
Regionales Datenzentrum Europa	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Regionales Analysezentrum	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Tide Gauge Benchmark (TIGA) Analysenzentrum	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut GeoForschungsZentrum Potsdam
Regionales Operation Zentrum Europa	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Beobachtungsstationen	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut GeoForschungsZentrum Potsdam
<b>International Laser Ranging Service (ILRS)</b>	
Analysezentrum	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
	GFZ Potsdam
Kombinationszentrum	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Datenzentrum	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Beobachtungsstationen	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

<b>International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)</b>	
Leitung (Chair) des IVS	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Analyse-Koordinator	Geodätisches Institut der Universität Bonn
Analysezentrum	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Geodätisches Institut der Universität Bonn
Kombinationszentrum	Geodätisches Institut der Universität Bonn
Datenzentrum	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Korrelationszentrum	Geodätisches Institut der Universität Bonn
Operationszentrum	Geodätisches Institut der Universität Bonn
Beobachtungsstationen	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG), Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG), Technische Universität München

## 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 (s. nachstehende Übersicht) orientierte schwerpunktmäßige Zuordnung der Verantwortungsbereiche für die Durchführung der Forschungsvorhaben vorgesehen werden.

Die beteiligten Institutionen sind:

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

Zusätzlich beteiligt sich der Lehr- und Forschungsbereich Theoretische Astrophysik, Universität Tübingen an den Arbeiten der FGS. (Abb. 7.1 gibt eine Übersicht).

Nachstehende Übersicht fasst die Zuordnung der Verantwortungsbereiche der Vorhaben des formulierten Forschungsprogramms zusammen.

Forschungsschwerpunkt	Im Verantwortungsbereich von					
	IAPG	FESG	DGFI	BKG	GIUB	Tüb.
Thematik						
Punktbestimmung		X	X	X	X	
Geophysik. Fluide			X			
Erdrotation	X	X	X	X	X	
Gravitationsfeld	X	X	X	X		
Kombination/Integration	X	X	X	X	X	
Fundamentalstation		X		X		
Pilotprojekte						
• Heliumkreisel						X
• Orientierung Kreisel		X		X		
• SELENE		X				
• VLBI			X	X	X	
• Methodenbank		X				

Im Rahmen des durch das BMBF geförderten Geotechnologieprogramms „Beobachtung des Systems Erde aus dem Weltraum“ entstand für mehrere Projekte eine sehr enge Zusammenarbeit von FGS und GFZ Potsdam (Integration von geodätischen Raumverfahren, GRACE Datenanalyse, GOCE-GRAND). Diese Zusammenarbeit wird in der nun genehmigten zweiten Förderperiode fortgesetzt. Mit dem Wechsel von Professor Rothacher von der FESG zum GFZ sollte die zukünftige Zusammenarbeit von FGS und GFZ in nächster Zeit grundsätzlich erörtert und vereinbart werden. Aus dieser Partnerschaft könnten wichtige Impulse für die Geodäsie und die Erdwissenschaften erwachsen. Die FGS wird die Initiative zu diesem Dialog nehmen.

Im Januar 2005 wurde auf Initiative des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst (BayStMinWFK) das Deutsche

Geodätische Forschungsinstitut (DGFI) durch den Wissenschaftsrat evaluiert. Ziel der Begutachtung war die Überführung des DGFI in die Leibniz-Gemeinschaft (ehemals Blaue Liste). Eine wesentliche, die FGS betreffende Empfehlung des Wissenschaftsrats ist eine „Neukonzeption, in der vor allem Möglichkeiten einer intensiveren Verbindung mit der TU München geprüft werden sollen“ (Pressemitteilung des WR vom 23.5.2005). In den kommenden Monaten wird ein Konzept für eine Neustrukturierung, entsprechend den Empfehlungen des Wissenschaftsrates, durch die betroffenen Einrichtungen erarbeitet.

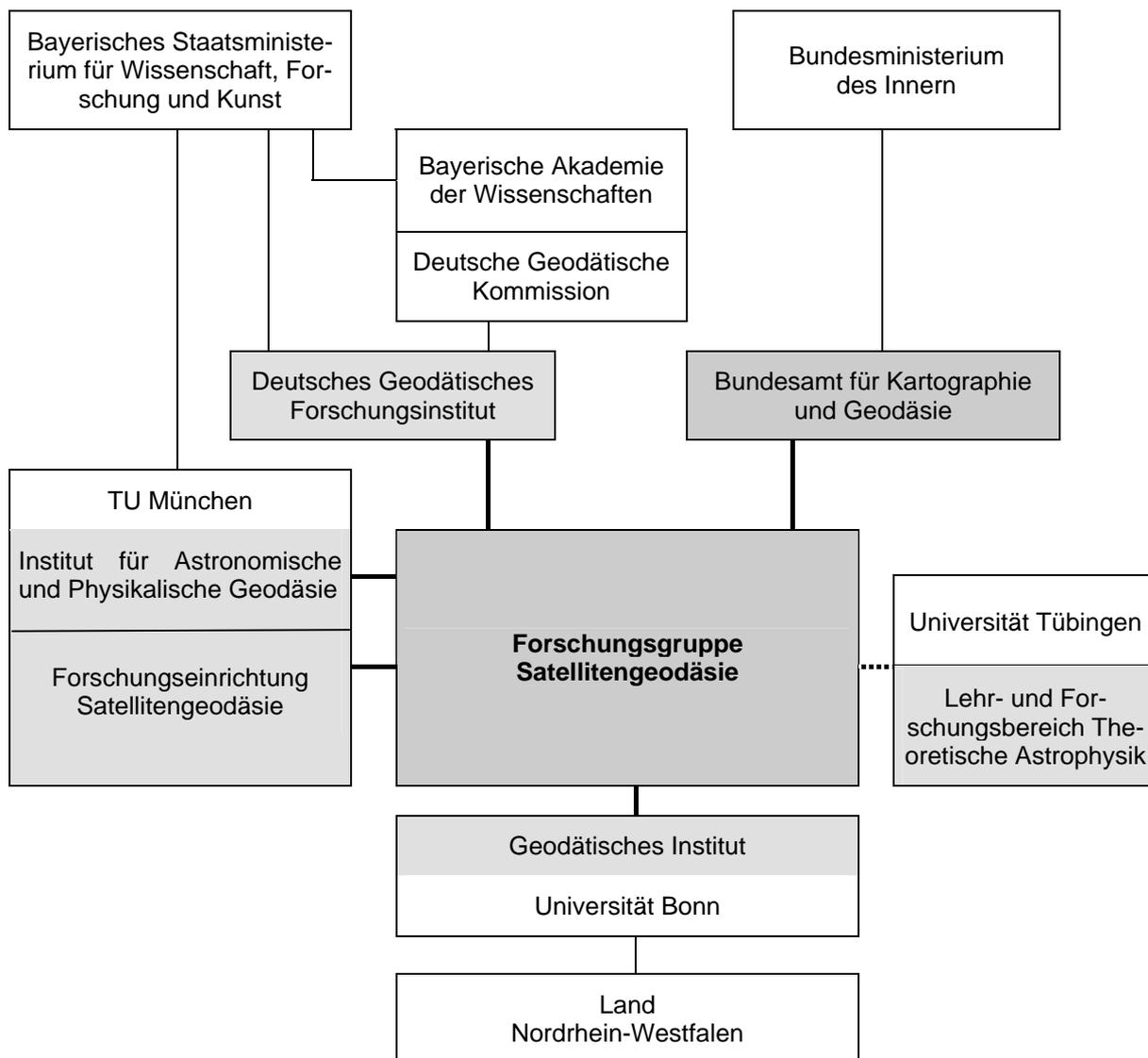


Abbildung 7.1 Übersicht über die an der FGS beteiligten Institutionen und ihre administrativen Einbindungen

## 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, Sachausstattung) sowie die erforderlichen Haushaltsmittel bereitzustellen. Dies gilt insbesondere auch hinsichtlich der Beteiligung an den Kosten des Betriebs und der Entwicklung der Fundamentalstation Wettzell, des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums TIGO in Concepción, Chile, und der Beobachtungsstation in O'Higgins, Antarktis.

Art und Umfang der Beteiligung richten sich einerseits nach der Zuordnung der Verantwortungsbereiche für die Durchführung der Forschungsvorhaben, andererseits nach den haushaltmäßigen Möglichkeiten der Beteiligten. Das BKG trägt dabei mit dem Ausbau und Betrieb der Fundamentalstation Wettzell und des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums TIGO in Concepción, Chile, eine Grundlast, die eine entscheidende Voraussetzung für die Lösung der Aufgaben der FGS bildet. Darüber hinaus leistet das BKG Beiträge zu Entwicklungsarbeiten, die die Anlage und Laufendhaltung der europäischen Bezugssysteme in Lage, Höhe und Schwere für die Referenzierung von Geoinformationssystemen sichert. Die FESG stellt notwendiges Personal für wissenschaftliche Entwicklungsarbeiten des Radioteleskops Wettzell und für den Ringlaser zur Verfügung. Das GIUB sichert die Korrelation der VLBI-Beobachtungen. In gleicher Weise werden von allen Partnern Auswertekapazitäten zu den Vorhaben der FGS beigetragen. Zur Zeit bestreiten die Beteiligten folgende Aufgaben aus der Grundausrüstung (Tab. 8.1).

Tabelle 8.1: Beiträge aus der Grundausrüstung

BKG	Betrieb der Fundamentalstation Wettzell
	Betrieb des Transportablen Integrierten Observatoriums in Chile
	Betrieb der SARS, O'Higgins
	Betrieb des MK-5-Korrelators
	IVS-Analysezentrum (VLBI)
	IVS-Datenzentrum (VLBI)
	ILRS-Analysezentrum (SLR)
	IGS Regionales Datenzentrum (GPS/GLONASS)
	IERS Zentralbüro
	EUREF / EPN Analysezentrum
	EUREF / EPN Analysekoordinator
	Assoziiertes IGS Analysezentrum für GLONASS Bahnen
	GRAF Operations-, Daten- und Analysezentrum
GIUB	Durchführung von VLBI-Korrelationen
	IVS-Analysezentrum (VLBI)
	IVS-Analysekoordinator (VLBI)
	IVS-Operationszentrum (VLBI)
	IVS-Kombinationszentrum (VLBI)

DGFI	IERS Kombinationsforschungszentrum
	ITRF 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)
	IVS Analysezentrum (VLBI)
	Aufbau eines Internationalen Altimeter Service (IAS)
FESG	Betrieb des Radioteleskops RT auf der Fundamentalstation Wettzell
	Beteiligung an der Entwicklung des neuen SLR-Systems SOS-W
	Beteiligung an der Entwicklung und am Betrieb des Ringlasers G
	Beteiligung an der Fortentwicklung des SLR-Systems WLRS
	Beteiligung an der Entwicklung großer Ringlaser in Cashmere (NZ)
IAPG	Arbeiten zur ESA Satellitenmission GOCE
	GRACE Sensoranalyse

Die Forschungsgruppe bemüht sich über Anträge bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), bei der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) und im 6./7. Rahmenprogramm der Europäischen Union um die Einwerbung von Drittmitteln. Eine weitere Möglichkeit eröffnet sich durch das BMBF/DFG-Sonderprogramm Geotechnologien. „Erfassung des Systems Erde aus dem Weltraum“ mit den Themenschwerpunkten „Schwerfeldmissionen“ und „Integration der Raumbenachrichtungsverfahren als Grundlage eines globalen geodätisch-geophysikalischen Beobachtungssystems“.

Tabelle 8.2 und 8.3 gibt eine detaillierte Auskunft über die in den Jahren 2001 bis 2005 abgeschlossenen sowie die laufenden und beantragten Drittmittelprojekte, die die Ziele des Forschungs- und Entwicklungsplans 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 Geodesy Service Provider Prototype" (GGSP)	laufend
BKG	Galileo Joint Undertaking	GJU/04/2412/CUNV/GIGA	Galileo Integrated Georeference Application (GIGA)	laufend
BKG	DFG	Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse"	Integration of Earth rotation, gravity field and geometry using space geodetic observations ("Rotation, gravity and geometry")	Vorantrag erfolgreich
BKG	BMBF und DFG	Sonderprogramm Geotechnologien	Integration der Raumberechnungsverfahren als Grundlage eines globalen geodätisch-geophysikalischen Beobachtungssystems (GGOS-D)	bewilligt
BKG	BMBF und DFG	Sonderprogramm Geotechnologien	GOCE-GRAND II, Regional Validierungs- und Kalibrierungsexperiment	bewilligt
DGFI	DFG	DR143/12-1	Entwicklung eines physikalisch konsistenten Systemmodells zur Untersuchung von Rotation, Oberflächengestalt und Schwerfeld der Erde	laufend
DGFI	EU	Interreg IIIB	Alpine Integrated GPS Network: Real-time monitoring and master model for continental deformation and earthquake hazard ("Alps-GPS Quakenet")	laufend
DGFI	EU	6th FP Specific Support Action	Assessing and forward planning of the Geodetic And Geohazard Observing Systems for GMES applications ("GAGOS")	laufend
DGFI	DFG	Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse"	Integration of Earth rotation, gravity field and geometry using space geodetic observations ("Rotation, gravity and geometry")	Vorantrag erfolgreich
DGFI	BMBF und DFG	Sonderprogramm Geotechnologien	Integration der Raumberechnungsverfahren als Grundlage eines globalen geodätisch-geophysikalischen Beobachtungssystems (GGOS-D)	bewilligt
FESG	Marsden	Royal Society NZ	Ring laser investigations of Earth fluctuation and gravitational wave detection (II. Development of the Ultra Large Ring Laser UG2)	laufend
FESG	DFG	GPS-IGS RO 2330/1-1 RO 2330/1-2	IGS Reprozessierung	laufend
FESG	EADS	Galileo	Galileo Bahnbestimmung	laufend
FESG	BMBF und DFG	Sonderprogramm Geotechnologien	Integration der Raumberechnungsverfahren als Grundlage eines globalen geodätisch-geophysikalischen Beobachtungssystems (GGOS-D)	bewilligt

Antragsteller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
FESG	DFG	Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse"	Modelling of Episodic-Transient Signals in Measurements of Large Ring Lasers	Vorantrag erfolgreich
FESG	DFG	Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse"	Lunar Laser Ranging: Consistent modelling for geodetic and scientific applications	Vorantrag erfolgreich
FESG	DFG	Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse"	Integration of Earth rotation, gravity field and geometry using space geodetic observations ("Rotation, gravity and geometry")	Vorantrag erfolgreich
FESG	DFG	Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse"	Untersuchung subtäglicher und episodischer Variationen der Erdrotation	Vorantrag erfolgreich
GIUB	DFG	CA 92/11-1	Kalibrierung von GPS-Antennen im HF-Labor	laufend
GIUB	DFG	Forschergruppe "Erdrotation und globale dynamische Prozesse"	Integration of Earth rotation, gravity field and geometry using space geodetic observations ("Rotation, gravity and geometry")	Vorantrag erfolgreich
GIUB	BMBF und DFG	Sonderprogramm Geotechnologien	Integration der Raumbenutzungsverfahren als Grundlage eines globalen geodätisch-geophysikalischen Beobachtungssystems (GGOS-D)	bewilligt
IAPG	ACS, Rom	GOCE-PDS	GOCE Payload Data System: Algorithm definitions gradiometry & GPS; Support to processor validation	laufend
IAPG	DFG	Rotationssensor Mitantragsteller RU 286/56-1 RU 286/56-2	Entwicklung eines hochgenauen Rotationssensors mit dem suprafluidem He als Arbeitsmedium	laufend
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	Deimos Space S.L., Madrid	GOCE-CMF	GOCE Calibration and Monitoring Facility - SSTI for Algorithms for the SSTI part	laufend
IAPG	DFG	Ozeanzirkulation RU 586/5-1 STA 410/9-1	Ozeanzirkulation und Schwerfeld	beantragt
IAPG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	GOCE-GRAND II	bewilligt
IAPG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	GRACE Optimierung	bewilligt

Tabelle 8.3: Liste der abgeschlossenen Drittmittelprojekte im Zeitraum 2001 - 2005

Antragsteller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
BKG	BMBF	03F0336D	Integration der geodätischen Raumverfahren und Aufbau eines Nutzerzentrums im Rahmen des Internationalen Erdrotationsdienstes (IERS)	abgeschlossen
DGFI	BMBF	EVAMARIA	Erkennung und Verfolgung anormaler Meereswasserstände im Nord-Atlantik	abgeschlossen
DGFI	DFG	Jordan-Rift-Dynamik	Modellierung der Krustendeformation und der Geodynamik in der afrikanisch arabisch-europäischen Tripelzone entlang der Jordan-Rift-Störung	abgeschlossen
DGFI	DFG	OCCAM	Entwicklung des VLBI-Programms OCCAM zur Bestimmung der Erdrotationsparameter in hoher zeitlicher Auflösung	abgeschlossen
DGFI	DFG	Optimale Netze	Optimaler Entwurf geodätischer Überwachungsnetze unter Berücksichtigung strenger Toleranzen	abgeschlossen
DGFI	DFG	Konsistente Referenzsysteme	Konsistente Realisierung von Referenzsystemen mit dem Verfahren VLBI	abgeschlossen
DGFI	BMBF	03F0336C	Integration der geodätischen Raumverfahren und Aufbau eines Nutzerzentrums im Rahmen des Internationalen Erdrotationsdienstes (IERS)	abgeschlossen
DGFI	DFG	Erdrotationsvektor	Ein prognostisches Modell des Erdrotationsvektors mit ozeanischen und atmosphärischen Drehmomenten	abgeschlossen
DGFI	BMBF	IERS	ITRS Analysis Center und Combination Research Center	abgeschlossen
FESG	BMBF	03F0336A Geotechnologien	Integration der geodätischen Raumverfahren und Aufbau eines Nutzerzentrums im Rahmen des Internationalen Erdrotationsdienstes (IERS)	abgeschlossen
FESG	SRON		GOCE End-to-End Simulator Validation	abgeschlossen
FESG	TU Graz	E2mgal	From Eötvös to Milligal 2	abgeschlossen
FESG	BMBF	03F325A und Leitantrag Geotechnologien	Entwicklung eines Ringlaser GEOsensors auf der Basis inertialer Rotationsmessung	abgeschlossen
FESG	DFG	Schn 240/6-3	Analyse der Zeitreihen lokaler Rotationssensoren	abgeschlossen
FESG	DFG	Schr 245/1-1	Bestimmung lokaler Einflüsse in den Zeitreihen inertialer Rotationsensoren	abgeschlossen

Antragsteller	fördernde Institution	Kennzeichen	Titel	Stand
GIUB	BMBF	03F0336B Geotechnologien	Integration der geodätischen Raumverfahren und Aufbau eines Nutzerzentrums im Rahmen des Internationalen Erdrotationsdienstes (IERS)	abgeschlossen
IAPG	DFG	ISA-CHAMP MU 1141/2-3	Integrierte Sensoranalyse am Beispiel CHAMP	abgeschlossen
IAPG	DFG	SHATUM-CHAMP RU 586/3-1	Sph.,risch harmonische Analyse des Gravitationsfeldes der Erde aus CHAMP Daten mit einem semianalytischen Ansatz	abgeschlossen
IAPG	TU Graz	Pre-EGG-C Study	Contributions to L1 to L2 processing system definition: Product and standards definition, Processing architecture; Development plan, etc	abgeschlossen
IAPG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	GRACE Sensoranalysis	abgeschlossen
IAPG	BMBF	Sonderprogramm Geotechnologien	GOCE-GRAND I	abgeschlossen
IAPG	Astrium	Future Missions	Science coordination: Scientific objectives for future geopotential missions, geodesy & ice	abgeschlossen
IAPG	SRON, Utrecht	GOCE-CMF	Study on GOCE calibration & monitoring facility	abgeschlossen

## 9 Zitierte Literatur

Die im Forschungsprogramm zitierte Literatur erhebt nicht den Anspruch einer repräsentativen Darstellung des Forschungsstands, sondern soll nur eine ergänzende Information zu dem jeweiligen Themengebiet sein.

- Bosch, W.: EOF-Analysen der Meeresspiegelschwankungen im Pazifik. Zeitschrift für Vermessungswesen (126) 74-81, 2001.
- Bosch, W.: Simultaneous crossover adjustment for contemporary altimeter mission. ESA Scientific Publications SP 572, ESA ESTEC, 2005.
- Capitaine, N., Chapront J., Lambert, S., Wallace, P.T: Expressions for the coordinates of the CIP and the CEO using the IAU 2000 precession-nutation model,"*Astron. Astrophys.* (400), 1145-1154, 2003.
- Donaubauer, A.J.: Interoperable Nutzung verteilter Geodatenbanken mittels standardisierter Geo Web Services. TU München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Dissertation, 2004.
- Drewes, H., Dodson, A., Fortes, L.P., Sanchez, L., Sandoval, P. (Eds.): Vertical Reference Systems. Springer, IAG Symposia, No. 124 (353 pp), 2002.
- Egger D.: Astro-Toolbox. Theorie. Schriftenreihe IAPG/FESG, 2004, 18. Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, München. 3-934205-17-8, 2004.
- Egger D.: Astro-Toolbox. Praxis. Schriftenreihe IAPG/FESG, 2004, 19. Institut für Astronomische Physikalische Geodäsie, München. 3-934205-18-6, 2004.
- European Space Agency: The Science and Research of ESA's Living Planet Programme, SP-1227, 1998
- Ihde, J., Sanchez, L.: A unified height reference system as a basis for GGOS. Proc. IAG Symposium G07, J. of Geodynamics, Elsevier 2005 (in press).
- Ilk, K.H., J. Flury, R. Rummel, P. Schwintzer, 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: 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, 2005.
- National Research Council: Satellite Gravity and the Geosphere, National Academy Press, Washington D.C., 1997.
- Neidhardt, A. (2005): Verbesserung des Datenmanagements in inhomogenen Rechnernetzen geodätischer Messeinrichtungen auf der Basis von Middleware und Dateisystemen am Beispiel der Fundamentalstation Wettzell. Dissertation, München 2005, im Druck
- Niell, A.; Whitney, A.; Petrachenko, W.; Schlüter, W.; Vandenberg, N.; Hase, H.; Koyama, Y.; Ma, C.; Schuh, H.; Tuccari, G.: VLBI 2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. IVS Annual report 2005, in Vorbereitung
- Richter, B., W. Schwegmann, W., R. Dick: Development of an Information and Database System for the IERS: status and outlook. Journal of Geodynamics, 2005, ca. 7 p., in print
- Richter, B.: Die Internationalen Dienste für die Geodäsie., Festschrift 50 Jahre IfAG / BKG, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2005, im Druck.

- Rothacher, M., Campbell, J., Nothnagel, A., Drewes, H., Angermann, D., Grünreich, D., Richter, B., Reigber, Ch., Zhu S.Y.: Integration of space techniques and establishment of a user center in the framework of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). Geotechnologien Science Report, No. 3, 137-141, 2003.
- Rummel, R., H Drewes, W Bosch, H Hornik (eds.) (2000) Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS), International Association of Geodesy Symposia Volume 120, Springer.
- Rummel, R., Flury, J., Gruber, Th.: The effect of the new generation of gravity field models from CHAMP, GRACE and GOCE on geodesy. In: Sanso, F. (Ed.), A window on the future of geodesy, IAG Symposia (128), Springer 2005.
- Schreiber KU, A Velikosetsev, M Rothacher, T Klügel, GE Stedman, DL Wiltshire (2004) Direct measurement of Diurnal Polar Motion by Ring Laser Gyroscopes, Journ. Geophys. Res., 109, B6.
- Schuh, H., R. Dill, H. Greiner-Mai, H. Kutterer, J. Müller, A. Nothnagel, B. Richter, M. Rothacher, U. Schreiber und M. Soffel (2003): Erdrotation und globale dynamische Prozesse. Stand und Ziele der Modellbildung, der Mess- und der Auswerteverfahren. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt/Main.
- Seitz, F.: Atmosphärische und ozeanische Einflüsse auf die Rotation der Erde. Dt. Geod. Komm., München, Reihe C, Nr. 578, 2004.
- Steigenberger, P., M. Rothacher, R. Dietrich, M. Fritsche, R. Rülke, S. Vey (2005), Reprocessing of a global GPS network, Journal of Geophysical Research, in review.
- Svehla, D., M. Rothacher: Kinematic precise orbit determination for gravity field determination. IAG Symposia, Springer (128) 181-188, 2005.
- Tesmer, V., Kutterer, H., Drewes, H.: Simultaneous estimation of a TRF, the EOP, and a CRF. In: Vandenberg, N., Baver, K. (Eds.): IVS 2004 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2004-212255, 311-314, 2004.
- Velikoseltsev, A.: The development of a sensor model for large ring lasers and their application in seismic studies. - Dissertation, TU München, 79 S., 2005.

## 10 Häufig verwendete Abkürzungen

APKIM	aktuelle plattenkinematische Modelle
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CHAMP	CHAllenging Minisatellite Payload
CRF	Celestial Reference Frame
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
DGK	Deutsche Geodätische Kommission
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
ENVISAT	Environmental Satellite
EOP	Erdorientierungsparameter
ESA	European Space Agency
EUREF	IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe
FESG	Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der TU München
GEO	Group on Earth Observation
GEOSS	Global Earth Observing System of Systems
GESIS	Gewässerinformationsdienst
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GGOS	Global Geodetic Observing System
GIUB	Geodätisches Institut der Universität Bonn
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOCE	Gravity Field and steady-state Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRDC	Global Runoff Data Centre
GRAF	Geodätisches Referenznetz
IAG	International Association for Geodesy
IAPG	Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München
IAU	International Astronomical Union
IAU2000	neues Präzessions- und Nutationsmodell der IAU

ICRF	International Celestial Reference Frame
IDS	International DORIS Service
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGS	International GNSS Service
ILRS	International Laser Ranging Service
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität, München
LLR	Lunar Laser Ranging
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
MIS	Metainformationssysteme
MHB2000	Nutationsmodel Matt
MPIfR	Max-Planck-Institut für Radioastronomie Bonn
SIRGAS	Südamerikanisches geozentrisches Referenzsystem (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas)
SLR	Satellite Laser Ranging
SOS-W	Satellite Observing System - Wettzell
TIGA	Tide GAuge benchmark monitoring project
TIGO	Transportable Integrierte Geodätische Observatorium
TOPEX / Poseidon	Ocean Topography Experiment
TRF	Terrestrial Reference Frame
UTC	Coordinated Universal Time
UTC(TCC)	UTC Realisierung in Concepción (TCC)
VLBI	Very Long Baseline Interferometrie
WDCC	World Data Centre Climate
WLRS	Wettzell Laser Ranging System
XML	eXtensible Markup Language