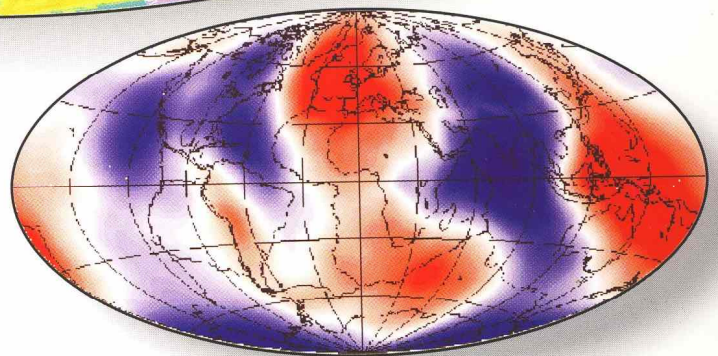
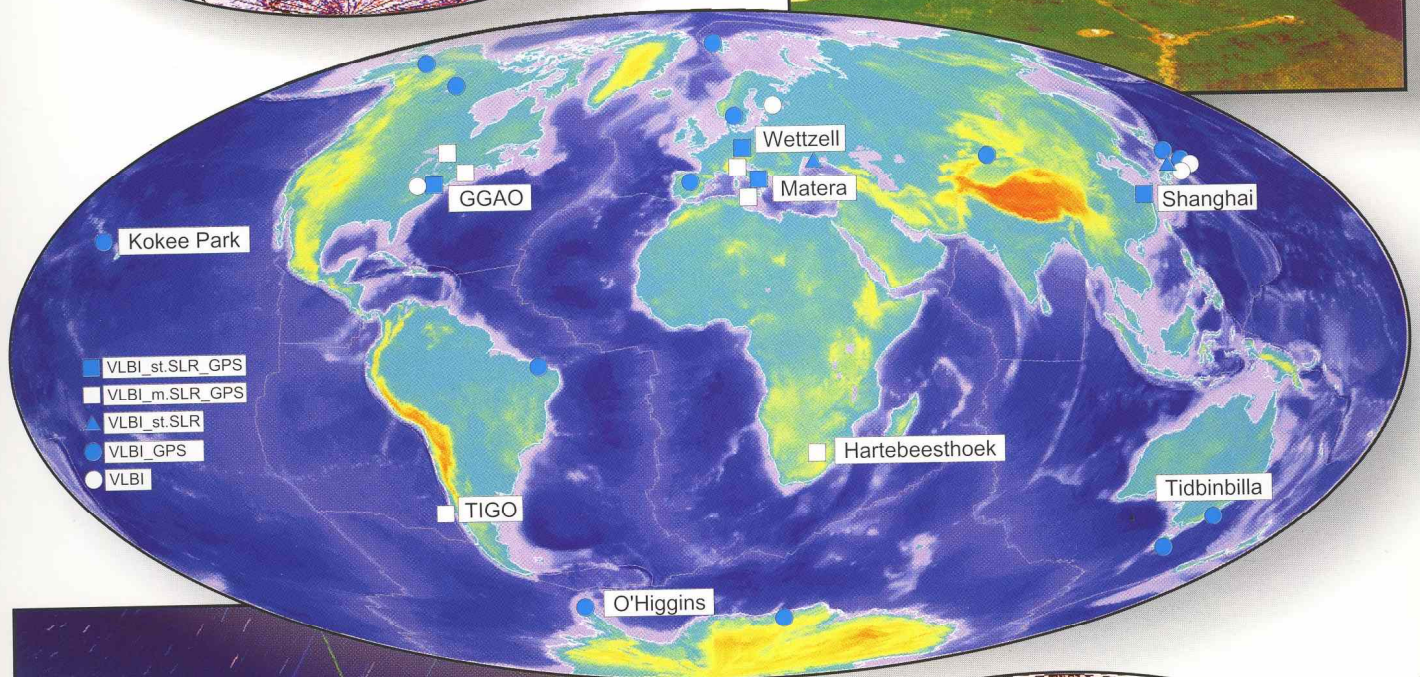
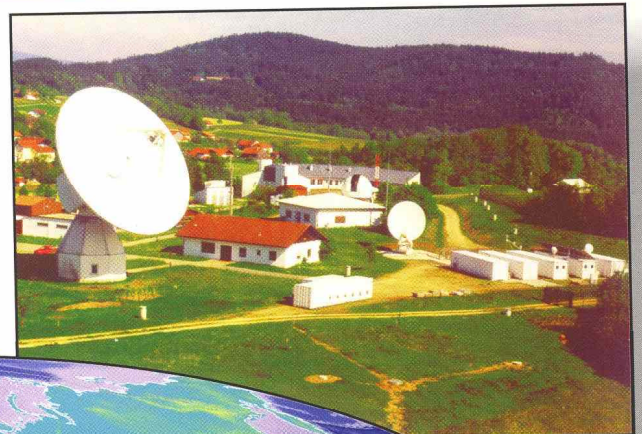
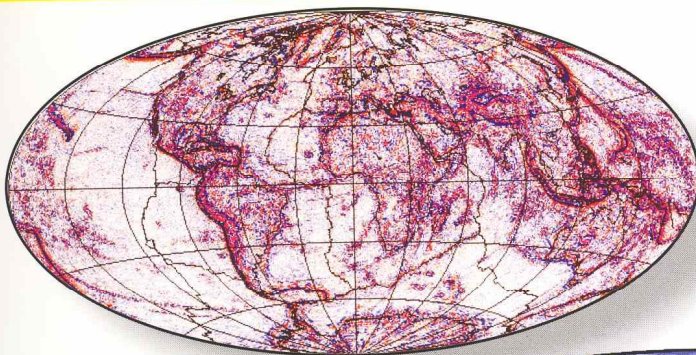


# FORSCHUNGS GRUPPE SATELLITEN GEODÄSIE



**Forschungsgruppe Satellitengeodäsie**

**FGS**

**Forschungs- und Entwicklungsprogramm**

**2001 – 2005**

**München / Frankfurt / Bonn**

**Juni 2000**



# Vorwort

Das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die Jahre 2001 bis 2005 schreibt in wesentlichen Elementen das Programm der Jahre 1996 bis 2000 fort. Gleichzeitig versucht das neue Programm den aus der Umwandlung des Instituts für Angewandte Geodäsie (IfAG) zum Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) resultierenden inhaltlichen Vorgaben voll Rechnung zu tragen. Dies heißt, dass mit dem vorliegenden Programm nicht nur ein geodätischer Beitrag zur Erfassung und Erforschung des „Systems Erde“ geleistet werden soll, sondern gleichzeitig ein Beitrag zur Bereitstellung eines konsistenten und genauen Systems von Bezugsrahmen als Grundlage für alle Geoinformationssysteme. Die Definition, Realisierung und Erhaltung von Bezugssystemen wird deshalb noch deutlicher das zentrale Thema dieses Programms sein.

Dabei orientiert sich die FGS an den internationalen Entwicklungen. Diese sind gekennzeichnet durch:

- Aufbau und Erhalt einer 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 Integration neuartiger linienhafter und flächenhafter Aufnahmesysteme in dieses System wie INSAR und Satellitenaltimetrie,
- die Ergänzung von Geometrie und Orientierung des Erdkörpers durch eine ebenso genaue Schwerefeldkomponente und
- die verstärkte Integration von Verfahren in einem konsistenten Auswertemodell.

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

Das vorliegende Programm markiert für die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie eine personelle Zäsur. Professor Seeger und Professor Schneider haben auf unterschiedliche Weise ganz entscheidend die Entwicklung der Satellitengeodäsie in der Bundesrepublik Deutschland geprägt und dies schon seit den Anfängen der Vorgängerinstitution der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie, dem so erfolgreichen Sonderforschungsbereich 78. Professor Seeger schaffte mit dem IfAG die materiellen und instrumentellen Voraussetzungen, die das heutige Niveau der Ausstattung der Fundamentalstation Wettzell ermöglichten. Gleichzeitig führte sein unermüdlicher Einsatz zu vielen erfolgreichen internationalen Zusammenarbeiten und Projekten. Professor Schneider war der Vordenker, der geistige Vater, dieser Institution. Die wissenschaftliche und konzeptionelle Entwicklung der FGS trägt seine Handschrift. Beiden Herren ist die FGS zu tiefstem Dank verpflichtet. Nachfolger von Professor Seeger ist Professor Grünreich; Professor Rothacher ist der Nachfolger von Professor Schneider.

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

Darüber hinaus dankt die FGS ihrem wissenschaftlichen Beirat für seine sehr wertvollen Ratschläge und für das überaus positive Votum zum Programm der Jahre 1996 bis 2000.

München, im Juni 2000

R. Rummel

- Sprecher -



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Einführung .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Langfristige Zielsetzung .....</b>	<b>12</b>
<b>3. Schwerpunkte des Programms .....</b>	<b>14</b>
<b>4. Ziele im Zeitraum 2001 bis 2005.....</b>	<b>22</b>
4.1 Punktbestimmung .....	22
4.2 Erdrotation .....	25
4.3 Gravitationsfeldbestimmung.....	29
4.4 Kombination und Integration geodätischer Raumverfahren .....	32
4.5 Fundamentalstationen Wettzell, TIGO und O'Higgins .....	37
4.5.1 Einsatz der Fundamentalstation Wettzell .....	39
4.5.2 Entwicklung der Fundamentalstation Wettzell .....	43
4.5.3 Entwicklung neuer Messsensoren (Lokale Rotationssensoren / Laser-Kreisel) .....	50
4.5.4 Transportables Integriertes Geodätisches Observatorium TIGO .....	52
4.5.5 Betrieb der geodätischen Einrichtungen der Beobachtungsstation O'Higgins in der Antarktis .....	54
4.6 Pilotprojekte .....	56
4.6.1 Heliumkreisel .....	56
4.6.2 Orientierung von Kreisel (optische Interferometrie) .....	56
4.6.3 Das SELENE-Projekt .....	57
4.6.4 Projektstudie VLBI.....	58
4.6.5 Objektorientierte Methodenbank (Astro-Toolbox) .....	58
4.6.6 Projektstudie IT Beobachtungs- und Analysedaten im Bereich der Raumverfahren.....	59
<b>5. Verantwortungsbereiche innerhalb der FGS.....</b>	<b>62</b>
<b>6. Beteiligung der FGS an internationalen Diensten .....</b>	<b>64</b>
<b>7. Haushaltmäßige Sicherung des Programms.....</b>	<b>68</b>
<b>8. Abkürzungen .....</b>	<b>70</b>



# Zusammenfassung

Die drei Säulen der Geodäsie in Wissenschaft und Anwendung sind die Punktbestimmung (Erfassung der Geometrie und Geometrieänderung des Erdkörpers in Einzelpunkten, in Profilen und über Flächen), die Erdrotation (die Transformation von einem raumfesten in ein erdfestes Bezugssystem) und das Schwerfeld der Erde. Die Herausforderung der kommenden Jahre ist die Integration dieser drei Komponenten in einem einheitlichen und stabilen Bezugssystem höchster Präzision. Damit eröffnet sich für die Geodäsie die Möglichkeit, den Erdwissenschaften für die Erdsystemforschung ein globales geodätisch/geodynamisches Beobachtungssystem zur Verfügung zu stellen und gleichzeitig für die Nutzer von Geodaten eine weltweit eindeutige Referenzierung zu erreichen.

Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprogramms der FGS ist es, einen Beitrag zur Realisierung eines derartigen Gesamtsystems zu liefern. Die FGS will insbesondere dazu beitragen, dass

- mit Hilfe einer ausgewählten Gruppe von Fundamentalstationen ein globaler Bezugsrahmen realisiert werden kann, der obigen Ansprüchen genügt,
- die Kombination der verschiedenen Raumverfahren auf einem Niveau von  $10^{-9}$ - Relativgenauigkeit erreichbar wird, sowohl über technologische Beiträge wie auch über neue Modellierungsansätze,
- die globale Darstellung des Erdschwerfelds – unter Einbeziehung der zeitabhängigen Komponenten – ein der Punktbestimmung und der Erdrotation vergleichbares Genauigkeitsniveau erreicht und
- durch moderne Datenerfassungs-, Datenverarbeitungs- und Datenübertragungssysteme die Ergebnisse den Nutzern schnell und mit hoher zeitlicher Auflösung verfügbar gemacht werden können.

Diese Ziele sollen über folgende Projekte erreicht werden:

- Schaffung eines einheitlichen Bezugssystems in Lage, Höhe und Schwere innerhalb Europas durch Kombination (methodisch) und Integration (technisch) der verschiedenen geodätischen Raumverfahren (Kap. 4.1);
- Internationaler Erdrotationsdienst (IERS): Maßgebliche Teilnahme der FGS mit dem Ziel, einen Beitrag zur Weiterentwicklung eines genauen und konsistenten Systems von Bezugssystemen zu leisten (Kap. 4.1);
- Geophysikalische Fluide: Kombination verschiedener Altimetermissionen mit dem Ziel der Überwachung des Meeresspiegels über Dekaden (Kombination mit in-situ Daten und Fernerkundungsdaten, Interpretation von Meeresspiegelschwankungen) (Kap. 4.1);
- Erdrotation: Bestimmung und Interpretation von kurzperiodischen Rotationsbeiträgen; Nachweis von nicht-gezeitenbedingten Einflüssen (ozeanisch, atmosphärisch, Variationen Grundwasser und Niederschlag); Neubewertung aller benutzten theoretischen Modelle (Kap. 4.2);
- CHAMP/GRACE/GOCE: Beitrag zur Schaffung sehr genauer Schwerfeldmodelle, zur Verifikation der Modellierung zeitvariabler Anteile des globalen Schwerfeldes und zur Nutzung dieser Modelle in Geodäsie, Geophysik und Ozeanographie (Kap.4.3);
- Kombination und Integration geodätischer Raumverfahren: Kombination auf der Ebene einzelner Parametertypen, der Normalgleichungen und der Beobachtungen (Kap.4.4);



- Ausbau und Weiterentwicklung der bestehenden Meßsysteme auf der Fundamentalstation Wettzell: Das Observatorium Wettzell gestattet die direkte Rückkopplung der theoretischen und methodischen Erkenntnisse der FGS. Für Wettzell steht für den Bezugszeitraum eine Modernisierung der Gerätesysteme an (Steigerung der VLBI-Auslastung im Rahmen des CORE-Experiment, erneuerte Steuersoftware für die Lasersysteme, Routineeinsatz der Zweifarbenmessung auf der Basis von Halbleiterdetektoren, Routinemessung mit Streakkamera, Einbeziehung des Zeit/Frequenzsystems in das Zeitübertragungsexperiment über GPS-Phasenmessung) (Kap.4.5.2).
- Entwicklung neuer Messsensoren (lokale Rotationssensoren/ Laserkreisel): lokale Winkelgeschwindigkeiten ohne Bezug zum Sternenhimmel oder zu einer Satellitenbahn (Kap.4.5.3);
- Inbetriebnahme des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums (TIGO) in Chile: ein Beitrag zu einer gleichmäßigen Verteilung der Fundamentalstationen über die Erde, um einen konsistenten und stabilen globalen Bezugsrahmen (als oberste Ebene einer Hierarchie von Bezugssystemen) zu erreichen (Kap.4.5.4);
- Laufenderhaltung des Messbetriebs der VLBI-Anlage O'Higgins in der Antarktis (Kap.4.5.5).

Mit einigen Pilotprojekten sollen zukünftige Entwicklungen vorbereitet werden:

- Weiterentwicklung des Tübinger Heliumkreisels (Umbau des Helmholtzresonators zu einem rotationssensitiven Detektor mit  $^4\text{He}$ , dann Modifikation auf  $^3\text{He}$ ) (Kap.4.6.1);
- Absolutorientierung von Kreiseln z.B. über optische Interferometrie (Kap. 4.6.2);
- SELENE-Projekt: Verknüpfung von VLBI und LLR auf der Mondoberfläche (Zusammenarbeit mit japanischer Raumfahrtbehörde) (Kap.4.6.3);
- Projektstudie VLBI (Echtzeitanbindung, Automatisierung, Integration verschiedener Aufzeichnungssysteme und Parallelbeobachtung von Quasaren und Navigationssatelliten (Kap.4.6.4);
- Weiterentwicklung der Methodenbank für geodätische Raumverfahren (Kap.4.6.5);
- Projektstudie IT Beobachtungs- und Analysedaten im Bereich der geodätischen Raumverfahren (Kap. 4.6.6).

# 1. Einführung

Die in vielen Bereichen der Wirtschaft und Industrie, des Verkehrs, der Verwaltung sowie der Wissenschaft und Forschung zunehmende Globalisierung macht den Einsatz sehr allgemeiner Informationssysteme in systemorientierten, ressort- und disziplinübergreifenden Planungs- und Handlungsabläufen erforderlich. Im engeren Sinne der Geodaten werden Geo-Informationssysteme (GIS) benötigt. Die Planungs- und Handlungsabläufe werden sich an dem übergreifenden Konzept des Systems Erde mit seinen vielfältigen Unter- und Teilsystemen orientieren. Die Hauptaufgaben eines solchen Systemansatzes sind Systemerfassung, Systemmodellierung und Systemvalidierung.

Wesentlicher Bestandteil der Geo-Informationssysteme ist deren Geo-Referenzierung, also der Raum-Zeit-Bezug der Geo-Daten. Diese setzt die Vermarktung und Erhaltung eines terrestrischen Bezugssystems voraus, von dem zu fordern ist, dass es hochgenau in allen Skalen (global bis regional) und echtzeitnah verfügbar ist.

Diese Forderungen sind erfüllbar durch den Einsatz geodätischer Raumverfahren sowie durch in situ-Messungen einerseits und durch die Möglichkeiten der Breitbandkommunikation andererseits. Letztere soll die Nutzung von verteilten Ressourcen (Daten, Modelle, Algorithmen, Rechenleistung, Dienste) erschliessen.

Die Lösung der Aufgabe muß sich auf einen

## **Verbund von Fundamentalstationen,**

die das Spektrum der einschlägigen geodätischen Raumverfahren einsetzen können und über Kommunikationsnetze mit Auswertezentren verbunden sind, als globalem Gerüst sowie

## **Stationsverbände zur Netzverdichtung**

stützen. Beides ist zu ergänzen durch **Geosensoren**, die genaue Anbindungsmessungen an bestehende Fundamentalstationen erlauben, weitgehend automatisierte Meßabläufe ermöglichen, echtzeitnahe Datenübertragung sicherstellen sowie den geologisch-geophysikalischen Besonderheiten der Einsatzorte Rechnung tragen. Geosensoren sollen in tektonisch/seismisch besonders aktiven Gebieten das durch die Fundamentalstationen vermarktete terrestrische Bezugssystem zugänglich machen und die dort gegebene geologisch-geophysikalische Spezialsituation erfassen.

Die von den vorgenannten Einrichtungen geleistete Systemerfassung ist zusammen mit anderen Geodaten in Geo-Informationssystemen für die echtzeitnahe, integrierte Verarbeitung der Meßdaten bereitzustellen und deren Ergebnisse für die

- Geo-Referenzierung von GIS,
- Modellierung und Validierung von Geoprozessen

sowie für

- Anwendungen etwa in der Navigation und
- Risikominimierung in gefährdeten Regionen

echtzeitnah zur Verfügung zu stellen.



## 2. Langfristige Zielsetzung

Die FGS setzt sich als langfristiges Ziel die

### **Vermarktung und Erhaltung eines terrestrischen Bezugssystems,**

die im Rahmen international koordinierter Programme/Dienste geleistet werden soll. Damit wird eine unerläßliche Voraussetzung zu dem generellen Ziel der Erfassung und Modellierung der Dynamik des Systems Erde geschaffen, nämlich die Georeferenzierung der sie beschreibenden Geodaten. Leitlinie soll sein, diese Aufgabe genau in allen Skalen (*global bis regional*) und echtzeitnah auszuführen sowie den Anwendern echtzeitnah die Ergebnisse zur Verfügung zu stellen.

Die beiden Forderungen „hochgenau in allen Skalen“ und „Echtzeitnähe“ sind durch den Einsatz geodätischer Raumverfahren einerseits und terrestrischer Verfahren andererseits sowie die Möglichkeiten der Kommunikationstechniken erreichbar. Eine wichtige Rolle kommt der Ausarbeitung optimierter Strategien für die Meßabläufe bis hin zur Bereitstellung der Zielgrößen im Rahmen der internationalen Dienste zu.

Das angestrebte Ziel läßt sich wie folgt charakterisieren : **„Erzeugung des terrestrischen Bezugssystems durch Transformation eines astronomischen Bezugssystems und eines genauen und globalen Höhenbezugs“**. Daraus ist ersichtlich, dass zur Lösung der gestellten Aufgabe verfügbar sein müssen:

1. ein astronomisches Bezugssystem und
2. eine der Qualität des astronomischen Bezugssystems korrespondierende Transformation bzw. der sie beschreibenden Transformationselemente.

Die FGS geht für den ersten Punkt davon aus, dass durch VLBI, optische Sterninterferometrie sowie durch astrometrische Satellitenmissionen wie FAME oder GAIA astronomische Bezugssysteme mit Radioquellen bzw. optischen Quellen hoher Richtungsgenauigkeit und gut bestimmten Eigenbewegungen verfügbar sein werden. Die FGS wird sich im Rahmen spezieller VLBI-Messungen wie bisher an der Vermarktung des astronomischen Bezugssystems beteiligen.

Die absehbaren wie auch neuartigen technologischen Entwicklungen zwingen dazu, die beiden gestellten Aufgaben in allen Schritten in einer angemessenen post-newtonschen Näherung einer metrischen Gravitationstheorie, vorzugsweise der EINSTEINschen, zu formulieren und zu lösen. Es ist zu erwarten, dass eine relativistische Theorie der Rotation der Erde in den kommenden Jahren ausgearbeitet sein wird und die genaue und zeitlich hochaufgelöste Bestimmung der Transformationselemente durch Kombination verschiedener Rotationssensoren, d.h. Realisierungen von Sternen- bzw. Trägheitskompassen erreichbar sein wird. Darüber hinaus stellt sich als dritte Aufgabe die Schaffung

3. eines hochaufgelösten Gravitationsfeldes der Erde.

Ein hochaufgelöstes Gravitationsfeld der Erde ist Voraussetzung, um das terrestrische Bezugssystem auch als Höhenbezugssystem auszugestalten bzw. über die Potentialflächenschar des Schwerfeldes der Erde ein Bezugssystem für geodätische Aufgaben bzw. zur Untersuchung ozeanischer und glaziologischer Vorgänge zu schaffen.

Darüber hinaus ist das Gravitationsfeld Indikator für den inneren Aufbau der Erde und über Erdmodelle für die Ausarbeitung der Theorie der Rotation der Erde von Bedeutung. Auch ist das Außenraumfeld eine Zwangsbedingung für geophysikalische Modelle des inneren Aufbaus der Erde.

Astronomische Fundamentalsysteme werden vermarktet über eine Minimierung der Pekuliarbewegungen ihrer Träger, d.h. es wird vermieden, Objekte mit ausgeprägten Pekuliarbewegungen zur Vermarktung heranzuziehen. Eine analoge Forderung wird man bei der Vermarktung terrestrischer Bezugssysteme versuchen einzuhalten, gerade auch im Hinblick auf eine repräsentative Bestimmung der Erdrotation als wesentlicher Transformation zwischen astronomischem und terrestrischem Bezugssystem. Die Schaffung

des terrestrischen Bezugssystems aus dem astronomischen Bezugssystem geschieht in der Praxis meist über Zwischensysteme. Insofern es sich bei diesen um Bezugssysteme handelt, die Objekte des Sonnensystems sind, ist zu erwarten, dass im Rahmen interplanetarer Missionen die Genauigkeit extragalaktischer Systeme auf bary- bzw. heliozentrische Systeme übertragen werden kann und damit diese als Ausgangssysteme für die Vemarkung und Erhaltung des terrestrischen Bezugssystems benutzt werden können. Das erfordert eine Erweiterung der Meßmöglichkeiten der Bodenstationen, insbesondere der Fundamentalstationen. Deren instrumentelle Ausstattung ist auch dahingehend zu ergänzen, dass einerseits einem Meßsystem verschiedene Meßobjekte zugänglich werden, beispielsweise Quasare und GPS-/GLONASS- Satelliten, und andererseits verschiedene Observable eines Meßobjektes (z.B. SELENE-Projekt).

Im Hinblick auf die Verdichtung der Trägermenge des terrestrischen Bezugssystems, also dessen Regionalisierung, werden satellitengestützte geodätische Raumverfahren wie Satellitaltimetrie und aus dem Bereich der Satellitenfernerkundung wie beispielsweise INSAR, also inverses VLBI, noch weiter an Bedeutung gewinnen. Sie ermöglichen eine flächenhafte Erfassung der Erdoberfläche und ihrer Veränderungen.

Die Aufgabe der Schaffung eines hochaufgelösten Gravitationsfeldes wird über die anstehenden Satellitenmissionen CHAMP, GRACE und GOCE sowie ergänzende Flug- und Bodenkampagnen gelöst werden.

### 3. Schwerpunkte des Programms

Die drei Schwerpunkte des Programms Punktbestimmung, Erdrotation und Gravitationsfeld sind die Grundpfeiler der Geodäsie. An ihrer zentralen Stellung hat sich bis heute nichts geändert, die Möglichkeiten ihrer Ausgestaltung wurden jedoch durch die modernen Raumverfahren revolutioniert. Über die geodätischen Raumverfahren konnte erstmals die Erde als Ganzes erfasst werden, ihre geometrische Form, ihr Gravitationsfeld und ihre Orientierung bezüglich eines raumfesten Bezugssystems. Über Aufbau und Erhalt eines hierarchisch geordneten Systems von Bezugssystemen entsteht ein äußerst genaues, konsistentes und stabiles Fundament für die Aufgaben der Georeferenzierung und Navigation. Gleichzeitig ist die Geodäsie in die Lage versetzt, einen wesentlichen Beitrag zur Erforschung des „Systems Erde“ zu liefern, wenn es gelingt Punktbestimmung, Erdrotation und Gravitationsfeld in einem gemeinsamen Bezugsrahmen zu einem konsistenten Beobachtungssystem zu verschmelzen.

Voraussetzung für das Erreichen dieser beiden Ziele ist es, die Verknüpfung der drei Grundpfeiler Punktbestimmung (Geometrie), Erdrotation und Gravitationsfeld auf einem Genauigkeitsniveau von  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  zu realisieren und ohne Diskontinuität über Dekaden zu erhalten (siehe Abbildung 3.1). Im Zentrum dieser Verknüpfung stehen eine kleine Anzahl, über den Globus möglichst gleichmäßig verteilter Observatorien, sogenannter Fundamentalstationen, auf denen möglichst viele der geodätischen Raumverfahren parallel betrieben werden.

Für einzelne Messverfahren und für Teile der oben genannten drei Grundbereiche wird das benötigte Genauigkeitsniveau bereits heute erreicht. Die Realisierung eines geschlossenen Gesamtgebäudes aus der Kombination aller beteiligten Verfahren erfordert jedoch noch die Lösung einer Vielzahl theoretischer, methodischer und technischer Probleme. Insbesondere ist die Verknüpfung von Punktbestimmung, Erdrotation und Gravitationsfeld auf einem Genauigkeitsniveau von  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  noch nicht realisiert, da die Komponente Gravitationsfeld generell zwei Größenordnungen ungenauer ist. Ziel des Forschungsprogramms der kommenden Jahre ist es, einen Beitrag zu diesem Komplex zu liefern, der in seiner Gesamtheit als die zentrale Herausforderung der wissenschaftlichen Geodäsie für die kommenden Jahre angesehen werden kann.

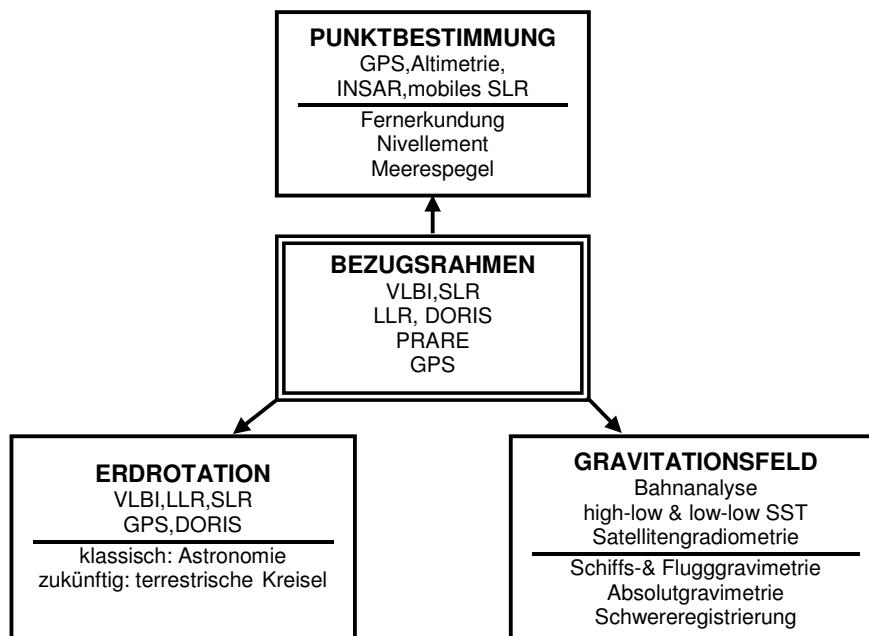


Abbildung 3.1: Verknüpfung der drei Komponenten Punktbestimmung, Erdrotation und Gravitationsfeld mit Hilfe eines globalen Bezugssystems höchster Genauigkeit (einschließlich der relevanten Beobachtungsverfahren).

## **Punktbestimmung**

Ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten zur optimalen Nutzung der geodätischen Positionierungsverfahren ist in der nächsten Zukunft zweifellos die kombinierte, integrierte Auswertung der Beobachtungen mit den verschiedenen Raumbereobachtungsverfahren. VLBI, SLR, GPS, GLONASS und DORIS haben einerseits jeweils individuelle Vorzüge (z.B. die Anbindung an das zälestische Inertialsystem bzw. die Kopplung an das Geozentrum, Wetterunabhängigkeit etc.), andererseits werden alle Techniken durch gleiche Effekte beeinflusst (z.B. die Atmosphäre), die bisher nicht als gemeinsame Parameter bei der Auswertung behandelt werden. Es gilt hierfür ein einheitliches Auswertekonzept zu erstellen, entsprechende Prozessierungssoftware zu entwickeln und die Ergebnisse für alle Bereiche der Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie für praktische Anwendungen (Land-, Luft- und Seenavigation, meteorologische Dienste, Vorbeugung von Naturkatastrophen etc.) verfügbar zu machen.

Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie als eine der größeren operationellen Einheiten internationaler geodätischer Forschung wird sich auch bemühen, Verantwortung und Dienstleistungen (Beobachtungen, Datenauswertungen und -analysen) für die wissenschaftliche Gemeinschaft zu übernehmen. Bei den internationalen Diensten und wissenschaftlichen Organisationen wird die FGS sich neben der seit langem ausgeübten Tätigkeit bei Beobachtungs- und Auswertetätigkeiten auch um die Aufgaben von Koordinations- sowie Produkt- und Forschungszentren bewerben. Dies betrifft nicht nur die bereits genannten, direkt mit der geodätischen Positionierung befassten Einrichtungen, sondern auch übergeordnete Institutionen (ICSU, IAU, IUGG, IAG, ...), in die Ergebnisse der Positionierung einfließen, wie z.B. den Internationalen Erdrotationsdienst (IERS), den Internationalen Geoid-Dienst (IGeS) und Projekte des Internationalen Lithosphärenprojekts (ILP).

Bei der Anwendung der Ergebnisse wird die FGS weiterhin intensiv in nationalen und internationalen Projekten mitarbeiten. Dies betrifft einerseits die klassische Nutzung der geodätischen Positionierung zur Erfassung und Modellierung zeitabhängiger Parameter (kontinuierliche Deformationen und sprunghafte Bewegungen), andererseits die Nutzung der anfallenden Metaparameter (z.B. troposphärische und ionosphärische Modelle, ozeanische Auflasteffekte) für Nachbardisziplinen. Die FGS sollte eine aktive Rolle bei der Verbreitung der geodätischen Ergebnisse in allen Zweigen der Naturwissenschaften und im Bereich der Geoinformationssysteme spielen.

Beispielhaft ist ein fundamentaler geodätischer Raumbezug für flächenhafte Geobasisdaten im globalen, regionalen und lokalen Zusammenhang (Stichworte sind Global Spatial Data Infrastructure (GSDI), National Spatial Data Infrastructure (NSDI, z.B. ATKIS)). Solche Daten haben die Funktion einer räumlichen Integrationsbasis für geowissenschaftliche und andere fachbezogene Geodaten. Erst die Datenintegration schafft die Voraussetzung für komplexe, ökonomische und zuverlässige GIS-Anwendungen (Stichwort Digital Earth).

Eine praktische Anwendung als bevölkerungspolitische Vorsorgemaßnahme ist die Schaffung eines einheitlichen geodätischen Referenzsystems für das Küstenzonenmanagement (Coastal Zone Management), wobei die bisher (zumindest in der Praxis) übliche Trennung von landbezogenen und seebezogenen Referenzsystemen aufzuheben ist. Dieser Anwendung kommt eine grosse Bedeutung zu, erwartet man doch, dass bereits um 2030 weltweit etwa 80 % der Menschen im Küstenbereich leben werden, wobei dieser Bereich infolge der zu erwartenden Klimaänderung (Global Change) stark gefährdet ist. Die Entwicklung von Frühwarnsystemen für den Küstenbereich ist deshalb dringlich; dazu ist auch die hochgenaue digitale Abbildung der Küstenzone erforderlich. Nur dadurch lassen sich z. B. Orkane und Überflutungen der Vergangenheit in GIS-Systemen nachbilden, Modelle entwickeln und kalibrieren, mit denen künftige Ereignisse durch Simulation prognostiziert werden können.

Die Bereitstellung von Basiskomponenten ist unabdingbar für die automatisierte Navigation von Sensorsystemen, die auf dem Land, der See und in der Luft bzw. im Weltraum für die Erfassung von Zuständen und Prozessen auf der Erdoberfläche eingesetzt werden. Damit wäre eine Überwachung mit unterschiedlichen Sensoren in einem einheitlichen räumlichen Bezugssystem möglich.

## **Erdrotation**

Das entscheidende Bindeglied zwischen dem raumfesten und dem erdfesten Bezugssystem stellt die Erdrotation dar, da in beiden Systemen die Rotationsachse der Erde Ausgangspunkt der Festlegung der Systeme ist. Die zeitlichen Änderungen der Erdachse in beiden Systemen sind der augenfällige Ausdruck für eine große Zahl verschiedenartiger geodynamischer Prozesse, die mit dem Energieaustausch zwischen den einzelnen Komponenten des „Systems Erde“ zusammenhängen. In diesem Sinne kann eine genaue Beobachtung der instantanen Rotationsachse und der Rotationsgeschwindigkeit wertvolle Anhaltspunkte für die Ausgestaltung und Verbesserung der theoretischen Modelle liefern.

Die Skala der beobachtbaren Rotationsschwankungen reicht von sub-täglichen bis zu geologischen Zeiträumen und umfaßt sowohl periodische, z.B. gezeiteninduzierte, als auch irreguläre und säkulare Anteile unterschiedlicher Stärke. Gegenwärtig beträgt die Messauflösung bei den Raumverfahren etwa 1 Millibogensekunde (mas) (Winkel) bzw. 0.1 ms (Zeit) auf kurzen Zeitskalen (~ 0.1 Tag) und 0.3 mas bzw. 0.03 ms auf mittleren und längeren Zeitskalen (~ 1 Tag). Die Modellierung kann auf diesem Genauigkeitsniveau noch nicht realisiert werden, was vor allem an dem unzureichenden Wissen über den inneren Aufbau der Erde, aber auch an unvollständiger Information über die Massenverteilung und Bewegungszustände der Atmosphäre und der Ozeane liegt.

Ein wichtiges Element bei der Untersuchung der gemessenen Erdrotationsschwankungen besteht in der Tatsache, dass es sich stets um integrale Effekte handelt, d.h. um Bilanzsummen, die sich durch die Addition von Drehimpulsbeiträgen aus verschiedensten Quellen ergeben. In den beiden letzten Jahrzehnten der Forschung im Bereich Erdrotation konnten erhebliche Fortschritte gemacht werden, insbesondere im Bereich der Interpretation der Schwankungen der Tageslängen, die zu etwa 80 bis 90% auf die Wirkung der zonalen Winde in der Atmosphäre zurückgeführt werden können. Zu dieser Erkenntnis haben sowohl die verbesserten Wettermodelle der verschiedenen globalen Zentren als auch die erwähnte höhere Auflösung und Genauigkeit der Beobachtungen beigetragen.

Programmatische Schwerpunkte sollen gleichermaßen in den Bereichen Beobachtung und Modellierung gesetzt werden. Auf der Beobachtungsseite rückt eine intensivere Nutzung und optimale Kombination der verfügbaren Raumverfahren sowie die Entwicklung und Erprobung gänzlich neuer Systeme, wie z.B. der Laserkreisel, in den Vordergrund mit dem Fernziel des "near real-time monitoring". Auf der Modellierungsseite werden die bislang nicht oder nur marginal beobachtbaren Sekundäreffekte der geodynamischen Prozesse (Ozeane, Eismassen, Grundwasser, Niederschläge, Vegetation, Erdbeben, Vorgänge im Erdinnern) einzubeziehen sein. Dabei sollen stärker als bisher systembezogene Ansätze verfolgt werden.

Die Ausschreibung der neuen Komponenten des IERS spiegelt das Anliegen der internationalen geodätischen Gemeinschaft, den Integrationsprozess der Einzelkomponenten stärker zu berücksichtigen wider. Das betrifft die Kombination der Verfahren VLBI, SLR, GPS zur Ableitung der Erdrotationsparameter (ERP) aber auch insbesondere die kombinierte Ableitung der Parameter der Referenzsysteme und der Erdrotation. Für beide Aufgabenstellungen sind sowohl theoretische als auch methodische Arbeiten erforderlich. Die Kombination ERP und ITRS bzw. die integrierte Ableitung der ERP- und ITRS-Parameter dürfte wohl der anspruchsvollste Teil am Internationalen Erdrotationsdienst sein. Die geplanten „Combination Research Centers“ verdeutlichen diesen Anspruch.

## **Gravitationsfeldbestimmung**

Das Schwerfeld der Erde hat in den Erdwissenschaften eine dreifache Funktion. Erstens reflektiert es die Dichtestruktur des Erdinnern. Es ist daher neben dem Magnetfeld und der seismischen Tomographie die dritte wichtigste geophysikalische Größe zur Erforschung der ozeanischen und insbesondere der kontinentalen Lithosphäre und des oberen Erdmantels. Zweitens läßt sich aus dem Erdschwerfeld das Geoid berechnen. Das Geoid entspricht der hypothetischen Oberfläche der Weltmeere im Ruhezustand.



Abweichungen der tatsächlichen Erdoberfläche vom Geoid bezeichnen wir als Topographie. Das Studium des Topographieverlaufs der festen Erde ist Grundlage für Fragen des Massenausgleichs; die Bestimmung der Topographie der Eisflächen ist Grundlage der Bilanzierung der Eismassen und die Topographie der Ozeane ist die zentrale Größe der Ozeanmodellierung, da sich aus ihr direkt die Oberflächenzirkulation ableiten läßt. Für Problemstellungen wie etwa der Festlegung eines globalen Höhensystems, der Bestimmung der Meerestopographie oder der Beobachtung des Meeresspiegelanstiegs, sind die geforderten Geoidgenauigkeiten jedoch extrem hoch. Drittens scheint es in naher Zukunft möglich, globale zeitliche Änderungen des Erdschwerefelds zu messen. Sie werden verursacht durch Massenverlagerungen, zum Beispiel jahreszeitliche Schwankungen in der Atmosphäre, Grundwasservariationen, Meeresspiegelanstieg, Schmelzvorgänge in den Gletschergebieten und an den Eiskappen oder postglaziale Ausgleichsvorgänge. Die Bestimmung zeitlicher Variationen des Erdschwerefelds stellt demnach einen neuartigen Beitrag der Geodäsie zur globalen Modellierung von geologischen und klimatischen Vorgängen dar.

Die Erfassung des äusseren Schwerefeldes der Erde erfolgt durch die Messung und Modellierung von Funktionalen des Erdschwerepotentials:

1. auf der Randfläche (mit terrestrischen Schweremessungen auf dem festen und flüssigen Rand der Erdoberfläche und indirekt mittels Satellitenaltimetrie auf dem Meer) und
2. im Aussenraum (mit Satellitenmissionen durch Bahnanalyse der Cannon-Ball-Satelliten).

Trotz großer Fortschritte in den letzten zwei Jahrzehnten ist die Kenntnis des globalen Erdschwerefeldes unzureichend. Während die Bestimmung der Schwere auf Einzelpunkten mit modernen supraleitenden Gravimetern und Absolutgravimetern mit einer Relativgenauigkeit von  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  erreichbar ist, ist die Felddarstellung um ein bis zwei Größenordnungen ungenauer. Sie ist daher mit den oben genannten Genauigkeiten für geometrische Form und Erdrotation nicht kompatibel. Will man eine Schwerefeldmodellierung mit einer Relativgenauigkeit von  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  realisieren, sind zudem die zeitlichen Veränderungen des Schwerefeldes zu berücksichtigen.

Mit den nun genehmigten Schwerefeldmissionen CHAMP (Start im Jahr 2000), GRACE (2001) und GOCE (2004) wird ein Quantensprung in der Bestimmung des Erdschwerefelds realisiert werden. Die FGS war maßgeblich an der wissenschaftlichen Vorbereitung und Durchsetzung der ESA-Mission GOCE beteiligt. Sie ist auch in die wissenschaftliche Nutzung von CHAMP und GRACE eingebunden. Die neuen Satellitenmissionen lassen eine Erhöhung der räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie eine Genauigkeitssteigerung der Erfassung der Schwerefeldparameter im mittelwelligen Bereich (1000 km bis unter 100 km Halbwellenlänge) erwarten. Darüber hinaus zeichnet sich die Möglichkeit der Erfassung von globalen Schwerefeldvariationen ab, die allein aus terrestrischen Messungen bisher nicht nachgewiesen werden konnten. Mit dem Vorstoß der Schwerefeldsatellitenverfahren in den mittelfrequenten Bereich wird die Entwicklung neuer Methoden der Kombination von Funktionalen der Erdschwerepotentials und von terrestrischen und Satellitendaten erforderlich.

Die Genauigkeit der europäischen Geoidbestimmung und damit auch der in Deutschland liegt bei Wellenlängen von 1000 bis 2000 km bei 1 – 2 Dezimeter. Vergleiche zwischen dem europäischen Geoid EGG97 und den Ergebnissen des EUVN/UEN zeigen europaweit Differenzen bis zu 0,5 m. Ein Beitrag der Satellitenschwerefeldmissionen zur Genauigkeitssteigerung der Erfassung des Schwerepotentials in diesem Spektralbereich in den Sub-Dezimeter-Bereich bedeutet einen qualitativen Sprung und ist für die praktische Nutzung der Ergebnisse der Schwerefeld-Geoidbestimmung, z. B. für die Realisierung von Höhenreferenzsystemen und für die Höhenbestimmung mit GPS, von großer Bedeutung. Ein globales Höhenreferenzsystem mit Dezimeter-Genauigkeit wird mit den Satellitenschwerefeldmissionen realisierbar.

Die Erfassung des hochfrequenten Anteils des Schwerepotentials (Wellenlängen von 100 km und kürzer) wird auch weiterhin von der Dichte und Genauigkeit von Fluggravimetrie und den terrestrischen Schweremessungen abhängen. Der spektrale Anteil der Wellenlängen kürzer als 100 km am Geoid von 3 cm macht jedoch deutlich, dass die praktische Bedeutung bzw. das Anwendungsfeld der terrestrischen Relativgravimetrie sich zukünftig in dem Maße reduzieren wird, wie vergleichsweise bei der Positionsbestimmung in den letzten 10 Jahren GPS die terrestrischen Messungen auf lokale Anwendungen verdrängt hat.

## Geophysikalische Fluide

Das Modell einer starren Erde genügt schon lange nicht mehr den Anforderungen, die sich durch die gesteigerten Messgenauigkeiten stellen. Dynamische Prozesse in Atmosphäre und Hydrosphäre verändern die Geometrie, beeinflussen die Kinematik der Erde, verursachen Rotationsschwankungen und verändern die Massenverteilung der Erde und damit das Gravitationsfeld. Um die Wirkungsmechanismen des „Systems Erde“ zu verstehen, müssen deshalb auch die geophysikalischen Fluide betrachtet werden.

Die Atmosphäre wurde für geodätische Raumverfahren lange Zeit lediglich als Störgröße betrachtet, wobei meteorologische Messgrößen z.B. zur Korrektur von Refraktionseinflüssen benutzt werden. Heute werden häufig Auswertemodelle durch zusätzliche Parameter erweitert, um atmosphärische Einflüsse direkt zu schätzen und zu berücksichtigen. Mittlerweile stehen auch Beobachtungstechniken mittels Mikrowellen zur Verfügung, um eine vollständige Tomographie der Atmosphäre zu erstellen. Durch Okkultationsmessungen mit GPS kann z.B. der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und aus Laufzeitunterschieden von Zwei-Frequenz-Messungen die Elektronendichte der Ionosphäre bestimmt werden. Die Verfahren erlauben Modellierungen von Zustandsparametern der Atmosphäre, die nicht nur für geodätische Raumverfahren, sondern auch in der Wetter- und Klimaforschung genutzt werden können.

Durch Fernerkundungsverfahren ist auch der Wissensstand über die Hydrosphäre explosionsartig gestiegen. Infrarotmessungen von Wettersatelliten liefern täglich globale Abschätzungen der Meeresoberflächentemperatur. Lediglich die Bewölkung beeinträchtigt eine globale Überdeckung. Die Satelliten-Altimetrie kann innerhalb von 10 - 35 Tagen die Meeresoberfläche global mit höchster Genauigkeit ausmessen und mit der gleichen zeitlichen Auflösung Änderungen des Wasserstandes von wenigen Zenitmetern nachweisen. In Verbindung mit wesentlich genaueren Bestimmungen des Geoid durch dedizierte Schwerefeldmissionen wie CHAMP, GRACE und GOCE wird eine erheblich genauere Abschätzung der Meerestopographie möglich. Da sich die Meerestopographie durch hydrodynamische Vorgänge ausbildet, sind direkt Rückschlüsse auf Verlauf und Intensität der Oberflächenströmungen möglich. Mit weiteren Zusatzinformationen wie der Meeresoberflächentemperatur kann auch auf Dichteveriationen der obersten Deckschichten der Ozeane geschlossen werden, so dass Wärme- und Massentransporte abschätzbar werden.

Globale Mittelwerte des Meeresspiegels lassen sich bereits für Missionszeiträume von mehr als sieben Jahren bilden. Die dabei erzielten Genauigkeiten sind sehr hoch und durchaus geeignet, die Frage des globalen Meeresspiegelanstiegs und seiner Beschleunigung etwa durch antropogene Einflüsse mittelfristig zu beantworten. Änderungsraten von 1-2 mm/Jahr können signifikant bestimmt werden, wenn instrumentelle Driften erkannt und die Altimeter kontinuierlich kalibriert werden. Die Satelliten-Altimetrie erlaubt zudem sehr differenzierte Aussagen zum Meeresspiegelanstieg. Bereits heute zeigt sich, dass für den mittleren Meeresspiegel *regional* sehr unterschiedliche Änderungsraten mit Werten bis zu  $\pm 20$  mm/Jahr auftreten, d.h. dass sich in einem Zeitraum von sieben Jahre der Meeresspiegel um nahezu 15 cm heben oder senken kann. Neben der Meerestopographie, die lange Zeit vollständig vernachlässigt wurde, erschweren diese Meeresspiegeländerungen eine konsistente Festlegung eines globalen Höhensystems, das bisher über Langzeit-Registrierungen regionaler Pegel an einem „mittleren“ Meeresspiegel ausgerichtet wurde.

Die Altimetrie besitzt trotz dedizierter Schwerefeldmissionen das Potential zu weiteren Verbesserungen des Schwerefeldes. Die unmittelbar an der Erdoberfläche abgeleiteten Schweredaten und die hohe räumliche Auflösung, die durch geodätische Missionsphasen von ERS-1 und Geosat möglich wurden, decken andere Spektralbereiche ab als die in Satellitenhöhe messenden Sensoren von CHAMP, GRACE und GOCE. Die Kombination hochauflösender Schwerefelder aus Altimetrie und den neuen Schwerefeldmissionen bleibt deshalb eine vielversprechende Aufgabe, der sich die FGS stellt.

## Zusammenfassung der Ziele

Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprogramms der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie ist es vor diesem Hintergrund, einen Beitrag zur Realisierung eines derartigen Gesamtsystems zu liefern. Die FGS will insbesondere dazu beitragen, dass

- mit Hilfe einer ausgewählten Gruppe von Fundamentalstationen ein globaler Bezugsrahmen realisiert werden kann, der obigen Ansprüchen genügt,
- die Kombination der verschiedenen Raumverfahren auf einem Niveau von  $10^{-9}$ - Relativgenauigkeit erreichbar wird, sowohl über technologische Beiträge wie auch über neue Modellierungsansätze,
- die globale Felddarstellung des Erdschwerefelds – unter Einbeziehung der zeitabhängigen Komponenten – ein der Punktbestimmung und der Erdrotation vergleichbares Genauigkeitsniveau erreicht und
- durch moderne Datenerfassungs-, Datenverarbeitungs- und Datenübertragungssysteme die Ergebnisse den Nutzern schnell und mit hoher zeitlicher Auflösung verfügbar gemacht werden können.

Diese Ziele sollen über eine Reihe von Projekten und einige zusätzliche Pilotprojekte erreicht werden. Die Pilotprojekte dienen der Vorbereitung von zukünftigen Investitionen im instrumentellen Bereich und Weichenstellungen auf dem Gebiet der Datenverarbeitung und Datenhaltung .

### Liste der wichtigsten Projekte:

- Schaffung eines einheitlichen Bezugssystems in Lage, Höhe und Schwere innerhalb Europas durch Kombination (methodisch) und Integration (technisch) der verschiedenen geodätischen Raumverfahren (Kap. 4.1);
- Internationaler Erdrotationsdienst (IERS): Maßgebliche Teilnahme der FGS mit dem Ziel einen Beitrag zur Weiterentwicklung eines genauen und konsistenten Systems von Bezugssystemen zu leisten (Kap. 4.1);
- Geophysikalische Fluide: Kombination verschiedener Altimetermissionen mit dem Ziel, der Überwachung des Meeresspiegels über Dekaden (Kombination mit in-situ Daten und Fernerkundungsdaten, Interpretation von Meeresspiegelschwankungen) (Kap. 4.1);
- Erdrotation: Bestimmung und Interpretation von kurzperiodischen Rotationsbeiträgen; Nachweis von nicht-gezeitenbedingten Einflüssen (ozeanisch, atmosphärisch, Variationen Grundwasser und Niederschlag); Neubewertung aller benutzten theoretischen Modelle (Kap. 4.2);
- CHAMP/GRACE/GOCE: Beitrag zur Schaffung sehr genauer Schwerefeldmodelle, zur Verifikation der Modellierung zeitvariabler Anteile des globalen Schwerefeldes und zur Nutzung dieser Modelle in Geodäsie, Geophysik und Ozeanographie (Kap.4.3);
- Kombination und Integration geodätischer Raumverfahren: Kombination auf der Ebene einzelner Parametertypen, der Normalgleichungen und der Beobachtungen (Kap.4.4);
- Ausbau und Weiterentwicklung der bestehenden Meßsysteme auf der Fundamentalstation Wettzell: Das Observatorium Wettzell gestattet die direkte Rückkopplung der theoretischen und methodischen Erkenntnisse der FGS. Für Wettzell steht für den Bezugszeitraum eine Modernisierung der Gerätesysteme an (Steigerung der VLBI-Auslastung im Rahmen der CORE-Experiments, erneuerte Steuerungssoftware für die Lasersysteme, Routineeinsatz der Zweifarbenmessung auf der Basis von Halbleiterdetektoren, Routinemessung mit Streackamera, Einbeziehung des Zeit/Frequenzsystems in das Zeitübertragungsexperiment über GPS-Phasenmessung) (Kap.4.5.2).
- Entwicklung neuer Messsensoren (lokale Rotationssensoren/ Laserkreisel): lokale Winkelgeschwindigkeiten ohne Bezug zum Sternenhimmel oder zu einer Satellitenbahn (Kap.4.5.3);
- Inbetriebnahme des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums (TIGO) in Chile: ein Beitrag zu einer gleichmäßigen Verteilung der Fundamentalstationen über die Erde, um einen konsistenten und stabilen globalen Bezugsrahmen (als oberste Ebene einer Hierarchie von Bezugssysteme) zu erreichen (Kap.4.5.4);
- Laufenderhaltung des Meßbetriebs der VLBI-Anlage O'Higgins in der Antarktis (Kap.4.5.5).

**Liste der Pilotprojekte, mit denen zukünftige Entwicklungen vorbereitet/eingeleitet werden sollen:**

- Weiterentwicklung des Tübinger Heliumkreisels (Umbau des Helmholtzresonators zu einem rotationssensitiven Detektor mit  $^4\text{He}$ , dann Modifikation auf  $^3\text{He}$ ) (Kap.4.6.1);
- Absolutorientierung von Kreiseln z.B. über optische Interferometrie (Kap.4.6.2);
- SELENE-Projekt: Verknüpfung von VLBI und LLR auf der Mondoberfläche (Zusammenarbeit mit japanischer Raumfahrtbehörde) (Kap.4.6.3);
- Projektstudie VLBI (Echtzeitanbindung, Automatisierung, Integration verschiedener Aufzeichnungssysteme und Parallelbeobachtung von Quasaren und Navigationssatelliten (Kap.4.6.4);
- Weiterentwicklung der Methodenbank für geodätische Raumverfahren (Kap.4.6.5);
- Projektstudie IT Beobachtungs- und Analysedaten im Bereich der geodätischen Raumverfahren (Kap.4.6.6).



## 4. Ziele im Zeitraum 2001 bis 2005

### 4.1 Punktbestimmung

#### Stand der Forschung und Langzeitperspektiven

Die Genauigkeit und die operationellen Einsatzmöglichkeiten der geodätischen Punktbestimmung haben in der letzten Dekade erneut eine dramatische Steigerung erfahren. Insbesondere durch die Einrichtung von internationalen Diensten (International GPS Service, IGS; International Laser Ranging Service, ILRS; International VLBI Service, IVS) wurden die Grundlagen zur Anwendung dieser geodätischen Raumverfahren in der globalen und regionalen Positionierung enorm verbessert. Die von den Diensten der Techniken unabhängig voneinander gelieferten Produkte finden in der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft große Verbreitung und werden durch Forschungsarbeiten innerhalb der Dienste sowie von anderen Wissenschaftlern und Institutionen ständig verbessert.

Die Laser-Entfernungsmessungen zu Satelliten (SLR) werden heute weltweit durch den ILRS koordiniert, und die Messdaten werden über Datenzentren schnell verfügbar gemacht. Bei der großen Anzahl von Satelliten mit optischen Reflektoren ist nur dadurch eine gute und schnelle Bahnbestimmung gewährleistet. Erstmals wurden im Jahre 1999 die Ergebnisse der SLR-Analysenzentren im ILRS (Stationskoordinaten und Erdrotationsparameter) systematisch verglichen und analysiert. Es ist zu erwarten, dass die verschiedenen Software-Pakete zur SLR-Auswertung durch diese direkten Vergleiche in Zukunft erheblich verbessert und im Hinblick auf die verwendeten Modelle und Standards homogenisiert werden. Die Laser-Beobachtungen zum Mond müssen in Zukunft sicher noch intensiviert werden.

VLBI-Messungen können erstmals eine (nahezu) lückenlose Zeitreihe von Beobachtungen liefern. Durch die Aufgliederung der Aktivitäten der einzelnen Stationen in globale Teilnetze (Continuous Observation of the Rotation of the Earth, CORE) werden die Kapazitäten der verfügbaren Teleskope optimal genutzt. Die Korrelation und Analyse der Beobachtungsdaten werden vom IVS global koordiniert, wobei erstmals eine große Zahl von Analysenzentren, teils mit regional begrenztem Beobachtungsmaterial und unterschiedlicher Software, zur Bestimmung der Stationskoordinaten und Erdrotationsparameter beitragen. Die zeitliche Auflösung und die Genauigkeit der Ergebnisse wird dadurch erheblich gesteigert. VLBI ist das einzige geodätische Raumverfahren, das den Bezug zwischen dem zälestischen Inertialsystem und dem terrestrischen Bezugssystem herstellt und wird deshalb auch in Zukunft unverzichtbar sein.

Bei der Anwendung des Global Positioning System (GPS) geht die Entwicklung eindeutig zur Anlage von Netzen permanent beobachtender Stationen in globalem (z.B. ITRF), kontinentalem (z.B. EUREF, SIRGAS) und nationalem (z.B. GREF, SAPOS) Rahmen anstelle der bisher üblichen zeitlich begrenzten Messkampagnen. Dadurch verlieren die klassischen Festpunktnetze vermärkter Bodenpunkte an Bedeutung und werden ersetzt durch die fest installierten GPS-Empfänger, die auch als aktive Stationen ihre gemessene oder berechnete Information direkt an die Nutzer übertragen können. Voraussetzung ist dafür die Verfügbarkeit der Bahnephemeriden der GPS-Satelliten in nahezu Echtzeit, was durch die entsprechenden Dienste gewährleistet wird. Unabhängig von dieser Entwicklung werden jedoch in begrenztem Rahmen auch in Zukunft zeitlich begrenzte Messkampagnen durchzuführen sein, vor allem in solchen Regionen, in denen die Infrastruktur zum Betrieb permanent beobachtender Stationen nicht vorhanden ist (z.B. fehlender Internet-Anschluss zur Datenübertragung).

Durch die Initiative der CSTG, des IGS und des ION wurde eine Test-Kampagne durchgeführt, um die Nutzbarkeit des GLONASS für die operationelle Punktbestimmung nutzen zu können (IGEX98). Auf Grund der Ergebnisse dieses Versuchs wird sich der IGS in Zukunft um die Einbeziehung von GLONASS-Beobachtungen in das internationale Netz bemühen. Es ist deshalb auch in diesem Bereich eine erhöhte Forschungsaktivität zu erwarten.

Die Kombination der verschiedenen geodätischen Raumverfahren zur präzisen Positionsbestimmung wird bisher operationell nur auf der Ebene der individuellen Ergebnisse im ITRF durchgeführt. Die Beobachtungen der einzelnen Techniken, die erheblich durch identische Parameter beeinflusst sind (z.B. Atmosphäre), werden bisher nicht gemeinsam in einer strengen Ausgleichungsprozedur verarbeitet. Hier liegt in der Zukunft mit Sicherheit ein großer Forschungsbedarf.

## **Bisherige Arbeiten**

Die an der FGS zusammengeschlossenen Institutionen haben sich in der Vergangenheit in verschiedenen Funktionen (Beobachtungen, Datensammlung und -archivierung, Analysen) intensiv an den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aller wichtigen geodätischen Raumverfahren beteiligt. Auf der Station Wettzell sowie weiteren global verteilten Stationen wurden Laser-Entfernungsmessungen und VLBI-Messungen durchgeführt (siehe 4.5). Zur Verdichtung des globalen GPS-Netzes als internationales terrestrisches Referenzsystem und für dedizierte Forschungsarbeiten wurden in mehreren Orten der Welt (Europa, Asien, Südamerika) permanent beobachtende GPS-Stationen eingerichtet. Sämtliche Beobachtungsdaten wurden an die internationalen Datenzentren übergeben und stehen der wissenschaftlichen Gemeinschaft für Forschungszwecke zur Verfügung. Daneben wurden GPS-Messkampagnen für verschiedene Zielsetzungen durchgeführt, z.B. in Südamerika zur Überwachung der Erdkrustendeformationen (Central and South America, CASA) und zur Anlage eines kontinentalen Referenzsystems (SIRGAS).

Im Rahmen der internationalen Dienste haben das BKG (IGS, IVS) und das DGFI (ILRS, EDC) die Funktionen von Datenzentren übernommen. Die Beobachtungsdaten werden kontinuierlich gesammelt, archiviert und den Nutzern (z.B. Analysenzentren) bereitgestellt. Daneben werden die Daten eigener Projekte (siehe oben) archiviert und ebenfalls interessierten Wissenschaftlern zur Verfügung gestellt.

Seit vielen Jahren führen die Institutionen der FGS Auswertungen und Analysen der verschiedenen geodätischen Raumverfahren mit verschiedenen Software-Paketen durch. Seit Einrichtung der internationalen Dienste fließen diese Arbeiten in die Analysenzentren ein. Es werden Laser-Messungen zum Mond (FESG), zu Satelliten (BKG und DGFI), VLBI-Messungen (BKG und GIUB) sowie GPS-Beobachtungen (BKG und DGFI) ausgewertet und über die Dienste der internationalen Gemeinschaft zugänglich gemacht.

Bei sämtlichen Arbeiten wurden neben der Erzeugung der Endprodukte (Punktkoordinaten) ständig intensive Forschungen zu Modellverbesserungen und zur Einbeziehung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse durchgeführt. Die Ergebnisse wurden interpretiert, in geowissenschaftlichen Untersuchungen angewandt (z.B. Plattentektonik und Krustendeformationen) und für die Praxis zur Verfügung gestellt (z.B. Landesvermessung). Die Arbeiten sind in zahlreichen Publikationen dokumentiert.

## **Forschungsziele**

Im hier behandelten Planungszeitraum der nächsten fünf Jahre sollen die Aktivitäten im Bereich der Beobachtungen zur geodätischen Punktbestimmung fortgeführt, die Auswertearbeiten den technischen Entwicklungsmöglichkeiten entsprechend aktualisiert und die wissenschaftlichen Analysen intensiviert werden. Daneben sollen Funktionen in internationalen Diensten und Vereinigungen übernommen und wesentliche wissenschaftliche Beiträge zu deren Arbeit geliefert werden.

Die Beobachtungen der Satellitenbeobachtungsstation Wettzell werden im nationalen, europäischen und internationalen Rahmen fortgeführt (siehe 4.5.1). Daneben werden das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO, siehe 4.5.4) sowie weitere Stationen der verschiedenen Beobachtungstechniken zur Laufendhaltung der Referenzsysteme betrieben.

Die Radioteleskope in Wettzell, O'Higgins (siehe 4.5.5) und des TIGO sollen in internationale Projekte der VLBI (z.B. CORE) eingebunden werden. Es sind dabei möglichst umfassende, effektive Beobachtungspläne

unter verantwortlicher Mitwirkung der FGS zu erstellen, die neben der hochgenauen zeitabhängigen Positionierung auch die Belange der Bestimmung der Erdorientierungsparameter (siehe 4.2) abdecken.

Die Laserentfernungsmessungen zum Mond und zu künstlichen Erdsatelliten sollen unter Berücksichtigung der vom ILRS aufgestellten Prioritäten fortgeführt werden. Neben den wichtigsten geodätischen Satelliten spielen die Beobachtungen zum Mond dabei weiterhin eine besondere Rolle zur Fortführung der bisher eingeleiteten Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet.

Die in verschiedenen geographischen Regionen installierten GPS-Empfänger sollen im Rahmen der nationalen und internationalen Projekte und Dienste (DREF, EUREF, ITRF, IGS) weiter betrieben und in ihrer Funktionsfähigkeit und Automatisierung ständig verbessert werden. Mobile GPS-Empfänger sind möglichst effektiv in solchen internationalen Projekten einzusetzen, die für die Forschungsarbeiten der FGS bedeutsam sind, z.B. zur Laufenthaltung von Referenzsystemen, gezielten Untersuchungen relevanter Parameter, begleitende Messungen in anderen Forschungszweigen wie Altimetrie und Schwerefeldbestimmung.

Bei der Erforschung neuer Auswertemethoden und der Aufstellung internationaler Richtlinien (Standards) muss die FGS eine bedeutende Rolle spielen. Es sind gezielte Forschungsarbeiten zur Verbesserung der Auswertemodelle (z.B. Auflasteffekte, Gezeitenwirkung, Einfluss der Atmosphäre) zu initiieren und durchzuführen. Verschiedene Softwarepakete zur Auswertung der einzelnen Beobachtungsverfahren sind ständig den neuesten Entwicklungen der Techniken sowie der wissenschaftlichen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Positionierung anzupassen. Zur gegenseitigen Kontrolle unterschiedlicher Auswertesoftware der gleichen Techniken sind innerhalb der FGS mehrere Softwarepakete einzusetzen und zu vergleichen. Es müssen Diskrepanzen aufgedeckt und (evtl. gemeinsam mit dem Software-Entwickler) beseitigt werden.

Neben der individuellen Auswertung der Beobachtungen der einzelnen Techniken muss in der nächsten Zukunft verstärkt auf dem Gebiet der gemeinsamen Auswertung der Beobachtungen sämtlicher geodätischer Raubeobachtungsverfahren zur hochgenauen Punktpositionierung geforscht werden. Es sind Modelle, Methoden und Algorithmen zu entwickeln, die entweder direkt von den Originalbeobachtungen der einzelnen Techniken ausgehen oder die Parameter, die mehrere Beobachtungstypen gemeinsam beeinflussen, so im Auswertungsprozess (z.B. im Normalgleichungssystem) berücksichtigen, dass sie einer strengen Prozessierung der dadurch korrelierten Beobachtungen gleichkommen. Diese Arbeiten sind in sehr enger Zusammenarbeit mit den relevanten internationalen Arbeitsgruppen (z.B. 'Combination Research Centers' des IERS und 'Subcommission on Combination' der CSTG) durchzuführen.

Die FGS wird sich an operationellen Auswertungen internationaler Projekte und wissenschaftlicher Messkampagnen weiterhin intensiv beteiligen. Die dadurch gewonnenen Daten und Erfahrungen werden in die damit verbundenen theoretischen Forschungsarbeiten und praktischen Anwendungen zur Analyse und Interpretation direkt einfließen. Sowohl die Beobachtungsdaten als auch die Ergebnisse werden dem internationalen Brauch entsprechend der wissenschaftlichen Gemeinschaft so weit wie möglich verfügbar gemacht.

Die im Rahmen der Beobachtungen und Auswertungen erhaltenen Ergebnisse sollen gemeinsam mit den Ergebnissen anderer Institutionen und Forschungsgruppen von der FGS wissenschaftlich analysiert und interpretiert werden. Dies muss so weit wie möglich interdisziplinär in Zusammenarbeit mit Geophysik, Ozeanographie und Meteorologie geschehen und ist in nationale und internationale Projekte, z.B. das deutsche Geotechnologienprogramm, das europäische WEGENER-Projekt und das Internationale Lithosphärenprogramm, zu integrieren. Nach den bisher überwiegend regional durchgeführten Modellierungen (Mittelmeerraum, Südamerika) der Erdkrustendeformationen sollen in Zukunft globale Modelle angestrebt werden. Dies kann z.B. im Rahmen des Projekts der „World Strain Map“ geschehen.

Die innerhalb der in der FGS vereinigten Institutionen gewonnenen übrigen (heterogenen) Daten, wie z.B. Ergebnisse der Gravimetrie und Schwerefeldbestimmung, Meeresspiegelanalysen und meteorologische Parameter, müssen gezielt in diese Arbeiten einbezogen werden. Es sind Interpretationen und



Modellentwicklungen für den Bereich der festen, flüssigen und gasförmigen Komponenten des Systems Erde zu erstellen.

Im Planungszeitraum 2001 - 2005 soll ein Schwerpunkt der Arbeiten auf die Untersuchungen zur Variation des Meeresspiegels gelegt werden. Dies betrifft bei der hochgenauen Positionierung vor allem die Vertikalkomponente der dreidimensionalen Punktkoordinaten (Höhen). Da die geodätischen Höhensysteme nach wie vor fast ausschließlich durch den mittleren Meeresspiegel an ausgewählten Bezugspegeln zu einer (willkürlich) festgelegten Bezugsepoche (meist über mehrere Jahre gemittelt) definiert sind, schließt dies die hochgenaue (vertikale) Positionierung dieser Pegel und die Analyse der Pegelregistrierungen mindestens über den Zeitraum seit der Definition des Höhensystems ein. Es sollen in internationaler Kooperation weltweit möglichst viele Pegel präzise positioniert werden, um tektonische Bewegungen von scheinbaren Meeresspiegeländerungen trennen zu können. Das globale Verhalten des Meeresspiegels soll zudem routinemäßig durch Satellitenaltimetrie überwacht werden. Die signifikante Bestimmung von Driftraten für den globalen Meeresspiegelanstieg ist nur durch Vergleich von GPS kontrollierten Pegelregistrierungen und langjährigen Analysen altimetrisch bestimmter Meereshöhen möglich. Wegen der direkten Beziehungen zwischen Meeresspiegel, Höhensystem und Erdschwerepotential (Geoid), ist eine enge Zusammenarbeit mit den Forschungsarbeiten zur Schwerefeldbestimmung (siehe IV.1.3) zwingend erforderlich.

Die FGS wird sich im Programmzeitraum 2001 - 2005 intensiv an den Arbeiten der internationalen Dienste zur Punktpositionierung beteiligen. Neben den bisher durchgeführten Aktivitäten zur Beobachtung und Datenauswertung soll auch versucht werden, übergeordnete Aufgaben wahrzunehmen. Eine enge Zusammenarbeit der an der FGS beteiligten Institutionen ist dabei unbedingt notwendig, um den großen Arbeitsanfall zu bewältigen.

Institutionen der FGS sind derzeit als Daten- und Analysenzentren im IGS, ILRS und IVS tätig. Diese Arbeiten sollen weitergeführt und evtl. intensiviert werden. Daneben sind Aufgaben im IERS, insbesondere solche, die im Zusammenhang mit der Realisierung und Laufendhaltung der terrestrischen Referenzsysteme stehen, zu übernehmen. Dies betrifft sowohl Bereiche des Management und der Produktgenerierung als auch der gezielten Forschung auf dem Gebiet der terrestrischen Referenzsysteme. Eine Zusammenarbeit mit anderen nationalen und internationalen Institutionen ist dabei unabdingbar.

Personenbezogene Aufgaben in internationalen Diensten und Organisationen, die von Mitgliedern der FGS wahrgenommen werden, sollen so weit wie möglich von den an der FGS beteiligten Institutionen unterstützt werden. Die betroffenen Mitglieder der FGS müssen die Möglichkeit haben, zur Durchführung erforderlicher Studien die Mitarbeiter aller Institutionen der FGS unter Beachtung der rechtlichen Vorschriften einzubeziehen.

## **4.2 Erdrotation**

### **Stand der Forschung und Langzeitperspektiven**

Die Interpretation der Erdrotationsschwankungen bezüglich eines inertialen, z.B. durch extragalaktische Radioquellen realisierten, Referenzsystems (Präzession, Nutation) erlaubt wertvolle Rückschlüsse auf den Aufbau, vor allem die Rheologie des Erdkörpers. Analysen der Variation des Rotationsvektors bezüglich eines erdfesten Bezugssystems (Polbewegung und UT1-UTC) geben Auskunft über das dynamische Verhalten des Erdinnern sowie der Hydrosphäre und Atmosphäre. Rotationsschwankungen im erdfesten System sind außerdem bei der Realisierung terrestrischer Referenzsysteme von entscheidender Bedeutung.

Obwohl sich die Nutationsmodelle von der ursprünglichen Annahme eines starren Erdkörpers über die Berücksichtigung des flüssigen Kerns und eines elastischen Mantels bis hin zum Einschluß der Atmosphäre und Ozeane weiterentwickelt haben, fehlt immer noch ein umfassendes Modell, das die Effekte der sich deformierenden Erde vollständig wiedergibt. Aus diesem Grunde weisen die Beobachtungen Diskrepanzen zu

den Modellen auf, die laufend durch die Messungen selbst bestimmt und nachgeführt werden müssen. Nach dem bis heute als Referenz gebräuchlichen Nutationsmodell von Wahr (IAU 1980) steht in diesem Jahr die Veröffentlichung eines neuen, auf den Arbeiten von Wahr, Dehant u.a. beruhenden Modells bevor. Dennoch werden die kontinuierlichen Beobachtungen im Sinne eines Monitoring weiterhin unverzichtbar bleiben, da auch auf dieser höheren Modellierungsstufe die Diskrepanzen zur Beobachtung nur kleiner, aber nicht verschwinden werden.

Der Einsatz moderner Messtechniken wie SLR, VLBI und GPS hat in den letzten Jahren zu einer beträchtlichen Erhöhung der Signalauflösung der Rotationsschwankungen geführt. Damit ist es möglich geworden, wesentlich subtilere Effekte zu beobachten, wie z.B. gezeiteninduzierte UT1-Schwankungen oder durch Massenverlagerungen am Erdkern erzeugte Polbewegungen. Die nahezu ohne nennenswerte Unterbrechungen seit Anfang der achtziger Jahre mit geodätischen Raumverfahren gewonnenen Messreihen weisen eine extrem hohe Genauigkeit auf (etwa 0,0003" in den Polkoordinaten und 0,02 msek in UT1), so dass die Aufdeckung kleinster Signale möglich wird.

Auf internationaler Ebene zielt man bei der Erfassung der Erdrotationsschwankungen vor allem auf immer kürzere Zeitspannen bei der Verfügbarkeit der aktuellen Rotationsparameter (Pollage und UT1). Da die Orientierung und der Betrag des momentanen Rotationsvektors bezüglich eines vereinbarten terrestrischen Referenzsystems die Verbindung zwischen Beobachtungen von Himmelsobjekten (Raumpunkten) und Stationskoordinaten herstellt, ist deren sofortige Kenntnis (in "real time") sowohl bei der schnellen stationären als auch bei der kinematischen Positionierung (präzise Navigation) unabdingbar. Internationale Dienste wie der "International GPS Service" (IGS) und seit dem vergangenen Jahr auch der ILRS (International Laser Ranging Service) und der IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) arbeiten vor allem unter dieser Zielsetzung.

Die geodätisch genutzte astronomische Radiointerferometrie (VLBI) wird vor allem wegen ihrer Funktion als Verbindung zwischen dem himmelfesten Inertialsystem und dem terrestrischen System ihre Stellung behalten. Für die kurzfristige Bereitstellung der Rotationsparameter und Erfassung der hochfrequenten Anteile (tägliche und subtägliche Perioden) eignen sich die VLBI- und GPS-Verfahren aufgrund der Wetterunabhängigkeit und ihres Potentials zur Automatisierung auch als "real time"-Messsysteme. Daneben werden jedoch auch neue Beobachtungstechniken, die auf längere Sicht mit geringerem Aufwand zu betreiben sind, zu entwickeln sein (z.B. Laserkreisel u.a.). Durch eine Kombination dieser Techniken wird es möglich sein, das gesamte Spektrum der Erdrotationsschwankungen mit höchster Auflösung quasi-instantan zu beobachten.

Im Sinne einer Vorwärtsmodellierung kann die routinemäßige Überwachung des Meeresspiegels durch Satellitenaltimetrie und die Analyse der Variabilität der Meeresoberfläche genutzt werden, um ozeanische Massenverlagerungen und deren Auswirkungen auf das Rotationsverhalten der Erde abzuschätzen. Die so abgeleiteten Zeitreihen für die ozeanisch bedingten Variationen der Trägheitsmomente (OAM) tragen wie die durch die Atmosphäre verursachten AAM-Zeitreihen dazu bei, die spektralen Bestandteile der beobachteten Zeitreihen der Erdrotationsparameter zu verstehen.

Bei der Interpretation der Rotationsschwankungen rückt im langperiodischen Bereich die Ableitung globaler klimatischer Veränderungen ("Treibhauseffekt", Abschmelzen von Polareis und Gletschern, Anstieg des Meeresspiegels) aus den durch sie verursachten Veränderungen des Trägheitsmoments der Erde mehr und mehr in den Vordergrund des Interesses. Im mittel- bis kurzperiodischen Teil des Spektrums treten dagegen neben den atmosphärischen und ozeanischen Effekten auch die Auswirkungen der globalen Grundwasserstände und Niederschlagsmengen in Erscheinung.

Die Modelle der Rotationsschwankungen bezüglich eines erdfesten Bezugssystems, nämlich die der freien Kreisbewegungen mit dem Hauptanteil der Chandlerschen Periode und der erzwungenen Variationen insbesondere aufgrund jahreszeitlicher Massenverlagerungen in der Atmosphäre, sind ebenfalls noch unzulänglich. Es fehlt immer noch eine Erklärung für die Aufrechterhaltung sowie der Variationen der Amplitude (und evtl. der Periode) der Chandlerschen Polbewegung. Auch die Darstellung des jährlichen Anteils der Polbewegung durch atmosphärische und ozeanische Erregung zeigt im Vergleich mit den Beobachtungen noch keine befriedigenden Ergebnisse.

## **Bisherige Arbeiten**

Die verschiedenen im Rahmen der FGS kooperierenden Arbeitsgruppen haben hauptsächlich im Beobachtungs- und Auswertebereich, aber auch zu einzelnen Themen der Modellierung und Interpretation von Erdrotationschwankungen Beiträge geleistet.

Ausgangspunkt im Bereich Modellierung und Interpretation waren die Grundsatzüberlegungen zur gleichzeitigen Bestimmung von erd- und raumfesten Erdrotationsparametern, wenn die untersuchten Perioden in die Nähe der Tagesperiode oder darunter liegen. Hier sind weiterhin konzeptionelle Arbeiten erforderlich. Weitere Themen waren die Verbesserung der Nutationsmodelle unter Betrachtung eines möglichst realistischen Erdmodells mit Berücksichtigung des Einflusses der Ozeane, die Berechnung der ozeanischen Anteile in den Schwankungen der Tageslängen auf der Basis von Gezeiten- und Strömungsmodellen, sowie die Herleitung und Berechnung der vollständigen Anregungsfunktion für die Atmosphäre, und die Ozeane einschließlich der wesentlich kleineren Einflüsse der kontinentalen Wasserspeicherung.

Für die Analyse der beobachteten Erdrotationschwankungen wurden vor allem die Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten der Wavelet-Transformation erarbeitet, wobei sowohl die Vorzüge als auch die Einschränkungen (z.B. Randprobleme und Grenzen der Auflösung im Zeit- und Frequenzbereich) angesprochen wurden.

Die Beteiligung an den aktuellen VLBI-Messprogrammen (NEOS, IRIS-S, IRIS-Intensive) bildete einen der Schwerpunkte im Beobachtungs- und Auswertebereich, wobei weiterhin der Einsatz der Station Wettzell und die Korrelation von ca. 20% der VLBI-Messungen am MK-III-Korrelator am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn die Grundvoraussetzungen bieten. Die parallel am Geodätischen Institut in Bonn und am BKG in Leipzig berechneten Lösungen für die Zeitreihen der Erdrotationsparameter wurden in jährlicher Folge an den IERS für die Zusammenstellung des Annual Report übermittelt. Entsprechende Lösungen für die SLR- und GPS-Messungen wurden vom BKG und vom DGFI berechnet und dem IERS vorgelegt.

## **Forschungsziele**

Voraussetzung für die Darstellung und Analyse der Erdrotationschwankungen ist nach wie vor die Definition und Realisierung geeigneter Referenzsysteme. Andererseits ist für die Realisierung eines terrestrischen Bezugssystems, einer Grundlage der geodätischen Positionierung, die Kenntnis der Variation der Erdrotation von fundamentaler Bedeutung. Eine Hauptaufgabe liegt deshalb bei den Forschungsarbeiten, welche die Referenzsysteme betreffen (raumfest realisiert durch die Koordinaten der Radioquellen bzw. Satelliten-Bahnen, erdfest durch zeitunabhängige Koordinaten der Beobachtungsstationen). Insbesondere für das erdfeste (terrestrische) Bezugssystem sind kinematische und evtl. dynamische Modelle (Oberflächenbewegungen z.B. durch rezente Plattentektonik und Krustendeformationen) zu entwickeln.

Die Mitwirkung an den globalen VLBI-Programmen zur regelmäßigen Beobachtung der Erdrotation soll im Zuge der Einrichtung des IVS und dem Aufbau des CORE Programmes (Continuous Observation of the Rotation of the Earth) verstärkt werden, und zwar sowohl im Bereich der Datengewinnung (mehr Beobachtungstage) als auch bei der Korrelation (auf 50% erhöhte Nutzung des neuen MK-IV-Korrelators als gemeinsame Einrichtung des BKG und des MPIfR) und der anschließenden geodätischen Auswertung durch die Gruppen in Bonn und in Leipzig. Ziel ist die kontinuierliche Erfassung der Erdrotationschwankungen durch unterschiedliche Stationskonfigurationen, wobei die einzelnen Teilnetze so eingerichtet wurden, dass sie jeweils ein bis zwei Wochentage im durchlaufenden Beobachtungsprogramm abdecken und so eine Überlastung von Stationen vermieden wird.

Die VLBI-Messungen werden aufgrund ihrer inertialen Anbindung auch zukünftig das Rückgrat der Erdrotationsbestimmung bleiben, aber sicher nicht ohne das enorme Potenzial der SLR- und vor allem der GPS-Messungen auskommen können. Gerade in den mittel- bis kurzperiodischen Bereichen ist eine möglichst dichte Bedeckung durch Messungen gefordert, die in diesem Grade nicht durch VLBI allein geleistet werden

kann, sondern heute sehr stark von GPS mit dem permanent beobachtenden, dichten globalen Stationsnetz des IGS getragen wird. Da zur Validierung neuer theoretischer Modelle nach Möglichkeit die aktuellsten und genauesten Daten aus den unterschiedlichen Messverfahren verwendet werden sollen, ergibt sich unmittelbar die Frage nach der optimalen Kombination der Messergebnisse verschiedener Verfahren. Diese Frage wird in den kommenden Jahren zum beherrschenden Thema werden und u.a. auch eine korrekte Abschätzung der von der Beobachtung herrührenden, zumeist systematischen Fehlereinflüsse erfordern. Umfassende Auswertemodelle zur kombinierten Behandlung der heterogenen Daten - auch bezüglich der getroffenen Festlegungen - sind deshalb zu entwickeln.

Ziel der Analysen der Rotationsschwankungen soll in den nächsten Jahren die Interpretation von kurzperiodischen Erscheinungen (tägliches und subtägliches Spektrum) sein. Insbesondere sind die durch Gezeiten der Ozeane induzierten Effekte in der Polbewegung zu untersuchen. Bei der Verfeinerung der Berechnung der Variationen, die durch atmosphärische Vorgänge, insbesondere durch zonale Winde und großräumige Luftdruckschwankungen, hervorgerufen werden, kann der ozeanische Effekt signifikant isoliert werden und seinerseits durch entsprechende Modelle dargestellt werden. Übrig bleiben die sog. Sekundäreffekte, wie die Auflastgezeiten und die durch die Polschwankungen und UT1-Variationen verursachten ozeanischen und atmosphärischen Effekte. Die Anwendung der Wavelet-Transformation wird bei der ersten Stufe der Datenanalyse merkbare Erleichterungen und Vorteile für die Detektion von vorübergehend periodischen Erscheinungen haben.

In den kurzperiodischen Bereichen werden die Beiträge der globalen GPS-Messungen eine besondere Bedeutung erlangen. Bereits heute existieren kontinuierliche GPS-Zeitreihen der Polschwankung und UT1-Variationen über mehr als 5 Jahren mit einer zeitlichen Auflösung von 2 Stunden, die mit VLBI-Serien verglichen und kombiniert und auf ihren geophysikalischen Gehalt hin untersucht werden sollen. Der Beitrag von GPS zur Nutation aufgrund langer Serien von geschätzten Nutationsraten soll ebenfalls genauer analysiert und mit VLBI-Resultaten verglichen werden. Es besteht auch ein großes Interesse, die Möglichkeiten der instantanen ("real time") Bestimmung der Rotationsschwankungen auszuloten und Vorstudien zur Realisierung anzustellen. Hier sollen sowohl die bestehenden Raumverfahren (in erster Linie VLBI und GPS) in Richtung auf einen vollautomatischen on-line-Betrieb weiterentwickelt werden, als auch innovative Verfahren entwickelt und auf ihre Eignung geprüft werden (z.B. Laserkreisel).

Neben den Effekten mit genau bekannten Perioden soll die Existenz von nicht-gezeitenbedingten Einflüssen, ozeanische und atmosphärische „normal modes“, globale Veränderungen des Grundwasserstandes und der Niederschlagsmengen, nachgewiesen werden. Während die atmosphärischen Einflüsse durch die Verfügbarkeit der Daten leicht berechnet werden können, besteht noch erheblicher Modellierungsbedarf für die Auswirkungen ozeanischer Einflüsse. Die Massenverlagerungen innerhalb der Ozeane können durch Satellitenaltimetrie abgeschätzt werden, wenn zusätzlich Meeresoberflächentemperaturen durch Fernerkundung bereit stehen. Berechnung und regelmäßige Aktualisierung von Zeitreihen der „Ocean Angular Momentum“-Werte sollen als Beitrag zum IERS Dienst „Monitoring Geophysical Fluids“ geliefert werden. In einem weiteren Schritt sind die Untersuchungen von Zeitreihen der Erdrotationsparameter auf die Perioden im Jahres- und Chandler-Bereich auszudehnen. Anschließend sind auch Interpretationen im langwelligen Bereich, die für die Klimaforschung bedeutsam sind, vorzunehmen.

Um in Richtung auf eine systembezogene multiskalige Betrachtungsweise voranzukommen, sollte die Gesamtheit der in der Auswertung der geodätischen Beobachtungen benutzten theoretischen Modelle für Präzession/Nutation, Erd- und Ozeangezeiten, Auflasteffekte der Atmosphäre und Ozeane, Bewegungen der Atmosphäre sowie der festen Erde usw. grundlegend neu überdacht und bewertet werden. Ansätze für die Verbesserung und Erweiterung der physikalischen Modelle sind auf der Grundlage neuer theoretischer Entwicklungen und alternativer Darstellungsmöglichkeiten zu finden.

## 4.3 Gravitationsfeldbestimmung

### Stand der Forschung und Langzeitperspektiven

Die Bestimmung der geometrischen Gestalt der Erde und ihrer zeitlichen Veränderungen hat heute, infolge des technologischen Fortschritts eine Relativgenauigkeit von etwa  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  erreicht. Dies bedeutet zum Beispiel, dass die Relativbewegung zweier VLBI-Stationen, die mehrere tausend Kilometer voneinander entfernt sind, auf wenige Millimeter genau bestimmt werden kann. Die begrenzenden Faktoren sind hauptsächlich die Beschreibung refraktionsbedingter Effekte und lokaler geologisch/meteorologischer Störungen. Mit diesen enormen Genauigkeiten ist der Geodäsie unter anderem der erste direkte Nachweis der Plattentektonik gelungen. Das gleiche Genauigkeitsniveau ist für die Verknüpfung von erdfesten mit raumfesten Bezugssystemen erreicht, wodurch der Einfluß von verschiedenartigsten geodynamischen, ozeanographischen und klimatologischen Prozessen auf Pol- und Rotationsschwankungen der Erde sichtbar gemacht werden konnte.

Die Bestimmung des globalen Erdschwerefelds oder des Geoids hat dieses Genauigkeitsniveau noch nicht erreicht. Sie ist um ein bis zwei Größenordnungen schlechter. So sind zum Beispiel Geoidhöhen, regional unterschiedlich, nur auf ca. 30 cm bis 1 m genau bekannt, d.h. auf  $10^{-6}$  bis  $10^{-7}$  bezüglich des Erdradius. Eine Anhebung dieses Standards, d.h. eine Verbesserung unserer Kenntnis des Erdschwerefelds um ein bis zwei Größenordnungen ist von grundsätzlicher Bedeutung. Denn einerseits reflektiert das Erdschwerefeld die Massenunregelmäßigkeiten des Erdinneren und ist damit, neben der Seismik und dem Magnetfeld, die wohl wichtigste Informationsquelle über die Dynamik des Erdkörpers, andererseits entspricht das Geoid der hypothetischen Ruhefläche der Ozeane. Die Bestimmung der Abweichung der wirklichen, mit Altimetern gemessenen Meeresoberfläche vom Geoid – der Meerestopographie – läßt damit Schlüsse auf Strömungsverlauf und -intensität der Ozeane zu. Gerade letzteres ist heute von großer Bedeutung im Zusammenhang mit der Erforschung des Wärmeaustausches zwischen Atmosphäre und Ozeanen. Damit wäre die Satellitenaltimetrie nicht mehr beschränkt auf die genäherte "Geoidausmessung" und eine Bestimmung der Ozeanvariabilität, sondern könnte sie in Kombination mit einem genauen und unabhängig von der Altimetrie abgeleiteten Geoid die Oberflächenströmungen aller Weltmeere global und zu jeder Zeit ermitteln. Schließlich ließen sich auf diesem Genauigkeitsniveau zeitliche Veränderungen der Erdschwerefelds infolge von Veränderungen der Massenverteilung der Atmosphäre, der Eiszonen, der Ozeane und der festen Erde ableiten.

Die bisherige Modellierung des Schwerefelds stützte sich auf drei komplementäre Informationsquellen: die Bahninformation einer Vielzahl geodätischer und nichtgeodätischer Satelliten, terrestrische Schwereanomalien (ergänzt durch Schwereanomalien aus Schiffsgravimetrie) und Satellitenaltimetrie. In einem sehr komplexen Kombinationsverfahren wurden hieraus in der Vergangenheit globale Schwerefeldmodelle erstellt. Dieser Ansatz hat inzwischen seine Grenzen erreicht; gravierende Verbesserungen können auf diesem Weg nicht mehr erzielt werden. Aus dieser Erkenntnis heraus bemüht man sich in der Geodäsie bereits seit mehr als zwei Jahrzehnten um die Realisierung von Schwerefeldsatellitenmissionen, die ausschließlich auf das Erreichen eines detaillierten und genauen Modells des Erdschwerefelds ausgelegt ist. Derartige Missionen werden sich auszeichnen durch (1) sehr niedrige Bahnen, (2) einen praktisch kontinuierlichen Fluß von homogenen Messwerten, (3) die Messung oder Kompensation von nicht gravitativen Störeinflüssen auf den Satelliten und (4) eine Beobachtungskonfiguration bei der das schwache Schwerefeldsignal über Differentiation verstärkt wird. Das sogenannte satellite-to-satellite tracking (SST) zwischen einem tieffliegenden Satelliten (Low Earth Orbiter = LEO) und den Satelliten des GPS wird den ersten drei Anforderungen gerecht, wenn der LEO mit einem Beschleunigungsmesser ausgestattet ist. Alle vier Vorgaben erfüllen das satellite-to-satellite tracking (SST) zwischen zwei LEOs in gleicher Bahn und die Satellitengradiometrie. Regionale Verfeinerungen bei der Bestimmung des Erdschwerefelds müssten von flugzeuggestützten Messmethoden kommen.

Nach jahrzehntelangen Vorstudien und vergeblichen Anläufen gelang in den letzten Jahren ein entscheidender Durchbruch. Es werden in kurzer Abfolge drei Schwerefeldmissionen durchgeführt werden. Es sind dies:

- CHAMP: Start April 2000, eine deutsche Mission, Federführung GFZ Potsdam, Ziele: Erdschwerefeld (lang- und mittelwelliger Anteil), Erdmagnetfeld, Atmosphärensondierung; Prinzip des Schwerefeld-experiments: SST zu den Satelliten des GPS kombiniert mit Beschleunigungsmessung.
- GRACE: Start im Jahr 2001, eine US-Mission mit starker deutscher Beteiligung, Ziel: genaue Bestimmung insbesondere der zeitlichen Variationen des Schwerefelds, Prinzip: SST zwischen zwei tieffliegenden Satelliten.
- GOCE: Start 2004, erste Mission des neuen wissenschaftlichen Erdkundungsprogramms der ESA, Ziel: hochauflösende Bestimmung des Erdschwerefelds, Prinzip: Satellitengradiometrie auf der Grundlage einer differentiellen Beschleunigungsmessung.

Die FGS war maßgeblich an der wissenschaftlichen Vorbereitung und Durchsetzung der ESA-Mission GOCE beteiligt. Sie ist auch in die Auswertung und wissenschaftliche Nutzung von CHAMP und GRACE eingebunden.

### **Bisherige Arbeiten**

In den letzten vier Jahren beteiligte sich das IAPG im Rahmen von Projektstudien und eigenen Untersuchungen an der Vorbereitung der beiden Satellitenmissionen CHAMP und GOCE. Gleichzeitig liefen am BKG Vorbereitungen an für ein Kalibrierungs- und Validierungsexperiment für die GRACE-Mission. Die Gesamtheit der bisherigen Arbeiten läßt sich in vier Themenbereiche einteilen:

- Sensoranalyse, d.h. Untersuchung und Simulation des Zusammenwirkens der verschiedenen Sensor- und Regelsysteme im Satelliten;
- Entwicklung von Auswerte- und Simulationsmethoden zur Erstellung eines globalen Schwerefeldmodells auf der Basis eines semi-analytischen Verfahrens;
- Vorarbeiten und Vorstudien zur wissenschaftlichen Nutzung von Schwerefeldmissionen in den Feldern Geodäsie, Ozeanographie und Physik der festen Erde;
- Vorbereitung eines international abgestimmten Validierungsexperiments mit Absolutgravimetern und supraleitenden Gravimetern.

Alle Arbeiten fanden in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern statt. Sie waren größtenteils in die Projektvorbereitung der Missionen CHAMP, GRACE und GOCE eingebunden. Wissenschaftler der FGS sind Mitglieder der wissenschaftlichen Beratergremien dieser drei Missionen. In den Jahren 1998 und 1999 konzentrierten sich die Arbeiten auf den Abschluß der Phase-A der GOCE-Mission und das Auswahlverfahren, das im Herbst 1999 in Granada erfolgreich abgeschlossen wurde. Damit führten jahrzehntelange Bemühungen, die bis in die Zeit des SFB78 zurückreichen, zum Erfolg.

### **Forschungsziele**

In den kommenden Jahren gilt es im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit die Grundlagen für eine erfolgreiche Realisierung, Auswertung und wissenschaftliche Nutzung der Missionen CHAMP, GRACE und GOCE zu schaffen. Damit verschiebt sich der Schwerpunkt der Arbeiten von Simulationsrechnungen auf die Verarbeitung, Kontrolle, Eichung und Ergänzung von Echtdateien. Die Teilnahme der FGS an den drei Missionen ist unterschiedlich in ihrer Art und in ihrem Umfang. Sie läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

#### **CHAMP:**

- Analyse des Gravitationsmesssystems; es umfasst die Elemente GPS-Empfänger, dreidimensionales Beschleunigungsmesssystem, Sternsensor und Steuerdüsen für die Lageregelung;
- Entwicklung eines Ansatzes zur globalen sphärisch-harmonischen Analyse des Erdschwerefelds aus CHAMP-Daten auf der Basis eines semi-analytischen und iterativen Verfahrens.

Beide Teilprojekte werden im Rahmen eines Bündelantrags durch die DFG gefördert.

**GRACE:**

- Aufbau eines regionalen Validierungsexperiments durch Vernetzung einer Anzahl von Absolutgravimetern und supraleitenden Gravimetern. Ziel ist der Nachweis und die Quantifizierung von zeitlichen Veränderungen des Erdschwerefelds, die mit GRACE gemessen werden sollen.

**GOCE:**

- Weiterentwicklung des „closed-loop“ und „end-to-end“ Simulators für das vollständige Sensorsystems; letzteres besteht aus den Elementen Gradiometer (9 Komponenten wovon 5 mit höchster Genauigkeit, Beschleunigungsdifferenzen), GPS-Empfänger, Sternsensor, Dragkompensationssystem, Lagekontrollsystem
- Beteiligung an einem internationalen Konsortium, das die Erstellung der Auswertalgorithmen und die Auswertung der GOCE-Mission übernehmen wird. Ziel ist es, sich insbesondere an den Elementen, Definition des Näherungsmodells, Kalibration, Auswertung von satellitengestütztem GPS und Nutzen von semi-analytischen Verfahren zu beteiligen.
- Entwicklung von Verfahren zur Kombination von Funktionalen des Erdschwerefelds.
- Wissenschaftliche Nutzung der GOCE-Daten. Hierbei werden folgende Themen bearbeitet werden:
  - Erstellung einer Schnittstelle zwischen regionaler und globaler Ozeanmodellierung und dem GOCE Schweremodell (aufbauend auf den Vorarbeiten der Jahre 1998 und 1999);
  - Globale Vereinheitlichung des Höhendatums;
  - GOCE-Geoid in Kombination mit den Arbeiten zu einem Europäischen Höhenreferenzsystem;
  - GOCE-Geoid und Satellitenaltimetrie (von GEOSAT bis JASON und ENVISAT) zur Bestimmung der Meerestopographie und ihrer Interpretation.

## 4.4 Kombination und Integration geodätischer Raumverfahren

### Stand der Forschung und Langzeitperspektiven

Drei primäre Beobachtungstechniken bilden heute das Fundament der geodätischen Raumverfahren, nämlich (1) das Satellite Laser Ranging (SLR) und Lunar Laser Ranging (LLR), (2) die Very Long Baseline Interferometry (VLBI), und (3) die Beobachtung von Mikrowellensignalen von Satelliten oder Satellitensystemen. Zur letzten Gruppe gehören insbesondere das amerikanische Global Positioning System (GPS), das russische Global Navigation Satellite System (GLONASS) und das französische Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite (DORIS). Sie werden ergänzt durch weitere Beobachtungstechniken wie Synthetic Aperture Radar (SAR), Satellitenaltimetrie, Schweremessungen und in Zukunft durch die neuen Satellitenmissionen (CHAMP, GOCE, GRACE, ...) zur hochauflösenden Bestimmung des Schwerefeldes der Erde.

Es ist bekannt, dass jede dieser Beobachtungstechniken ihre Stärken und Schwächen hat, dass die individuell erreichte Genauigkeit insbesondere durch systematische Fehler begrenzt wird und dass nur detaillierte Vergleiche und eine rigorose Integration der unterschiedlichen Techniken zu einer wesentlichen Steigerung der Konsistenz und Qualität der Resultate führen werden. Die Stärken der einzelnen Techniken sind insbesondere:

- VLBI: Bezug zum Inertialsystem und Sicherung der Langzeitstabilität
- SLR: Bezug zum Erdschwerefeld (langwelliger Anteil, Massenschwerpunkt)
- GPS: Verdichtung des terrestrischen Referenzsystems durch massenhafte Punktbestimmung
- DORIS: Homogenes globale Stationsverteilung
- Altimetrie: Bestimmung von Geometrie und zeitlichen Änderungen des Meeresspiegels
- CHAMP/GOCE/GRACE: Verdichtung des Erdschwerefeldes durch Erfassung hochauflösender Anteile

Die Integrationsbemühungen müssen dabei auf vier unterschiedlichen Ebenen stattfinden:

1. **Verknüpfung der Beobachtungstechniken auf Fundamentalstationen:** Die Verknüpfung der einzelnen Beobachtungstechniken wird durch die Kollokation von mehreren Verfahren auf einer Beobachtungsstation erreicht. Diese Fundamentalstationen (wie z.B. Wettzell) sind für die Konsistenz der Bezugssysteme und die Langzeitstabilität von größter Bedeutung. Ohne sehr genau gemessene Exzentrizitäten zwischen den Beobachtungsinstrumenten einer Fundamentalstation geht der Integrationsaspekt weitgehend verloren. Die Genauigkeit der lokalen Exzentrizitäten bildet bereits jetzt einen der Faktoren, die die Realisierungsgenauigkeit eines gemeinsamen Referenzsystems begrenzen.
2. **Beobachtung von Satelliten mit unterschiedlichen Beobachtungstechniken:** Eine Verknüpfung der Beobachtungstechniken ist auch auf Satelliten möglich. Auch hier ist die Kenntnis der Exzentrizität der Zielpunkte (GPS-Antennenphasenzentrum, SLR-Reflektor, DORIS-Antenne, Altimeter) eine wesentliche Voraussetzung. Das Beispiel TOPEX/Poseidon hat gezeigt, wie fruchtbar diese Art Verknüpfung für die hochgenaue Bahnbestimmung und die Erfassung systematischer Effekte ist. Die Beobachtung von GPS-Satelliten mit VLBI-Teleskopen würde ebenfalls in diese Kategorie fallen.
3. **Modellierung der Beobachtungen (Standards):** Damit Parameter, die von mehreren Raumverfahren bestimmt werden (z.B. Stationskoordinaten und ERPs), kombiniert werden können, müssen für die Auswertung der unterschiedlichen Beobachtungstypen einheitliche physikalische Modelle verwendet werden (z.B. für die Erdzeiten, die ozeanischen Auflasteffekte oder die subtäglichen Erdrotationschwankungen). Die IERS Conventions bilden hier eine wichtige Grundlage.
4. **Parametrisierung:** Eine sinnvolle Kombination von gemeinsamen Parametern ist zudem nur dann möglich, wenn bei den verschiedenen Auswerteprogrammen dieselbe Parametrisierung vorgenommen wurde (gleiche Definition der Parameter, gleiche zeitliche Darstellung und Auflösung, ...). Dazu braucht



es neben der Übereinstimmung in den verwendeten Modellen also auch einen Konsens über eine sinnvolle Parametrisierung.

In Richtung einer immer stärkeren und konsequenteren Integration und Kombination der geodätischen Raumverfahren hin zu einem „Integrated Global Geodetic Observing System“ (IGGOS) bewegen sich auch die internationalen Organisationen wie der IERS, die IAG, die IUGG und die CSTG. Während vor ein paar Jahren bei ITRF-Realisierungen die Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten noch getrennt und ohne Varianz-Kovarianz-Matrizen berechnet worden sind, wird heute eine korrekte Kombination einschliesslich einer Varianzkomponentenschätzung durchgeführt. Die Kombination der Resultate innerhalb der einzelnen Beobachtungstechniken ist die Aufgabe der Dienste IGS, IVS, ILRS und IDS. So werden im Rahmen des IGS bereits Bahnen, Stationskoordinaten, Erdrotationsparameter und Troposphärenparameter zu konsistenten Produkten kombiniert. Diese Produkte bilden in Zukunft die Basis für eine umfassende Kombination der Resultate der geodätischen Raumverfahren. Als Datenformat hat sich für den Austausch von Lösungen (Normalgleichungen) das Software Independent Exchange Format (SINEX) durchgesetzt.

In der Zukunft wird angestrebt, nicht nur Stationskoordinaten, Stationsgeschwindigkeiten und Erdrotationsparameter der verschiedenen Techniken korrekt zu kombinieren, sondern sämtliche Parametertypen, die in mehr als einer Beobachtungstechnik vertreten sind. Dies umfasst neben dem ITRF, dem ICRF und den Erdrotationsparametern auch atmosphärische Parameter (Troposphäre und Ionosphäre), Gezeitenparameter und schliesslich das Gravitationsfeld der Erde. Neben der Kombination der Techniken auf der Ebene des Parameterraums (Normalgleichungen) wird auch die Kombination auf der Stufe der Beobachtungen eine immer wichtigere Rolle spielen.

### Bisherige Arbeiten

Die eigentliche Basis für die Integration der geodätischen Raumverfahren wird durch Fundamentalstationen wie Wettzell gebildet. Durch das kontinuierliche Betreiben und Weiterentwickeln der Station Wettzell mit ihrem vielseitigen Instrumentarium leistet die FGS somit einen bedeutenden Beitrag zur Integrationsproblematik. So schafft beispielsweise der Betrieb von Wasserdampfadiometern neue Vergleichs- und Integrationsmöglichkeiten auf dem Gebiete der Troposphärenmodellierung. In regelmässigen Abständen wurden in Wettzell zudem lokale Vermessungen vorgenommen, um eine Genauigkeit von 1-2 mm für die Exzentrizitäten zwischen den Referenzpunkten der einzelnen Beobachtungsinstrumente sicherzustellen.

Die in der FGS zusammengeschlossenen Institutionen haben sich in den letzten Jahren ein sehr breites Wissen erarbeitet, sowohl was die Beobachtungstechniken – in der Fundamentalstation Wettzell sind ja SLR/LLR, VLBI und GPS sowie weitere Instrumente (siehe Kapitel 4.5) lokalisiert – als auch was die Verarbeitung der Beobachtungsdaten der geodätischen Raumverfahren betrifft (siehe Tabelle 4.4.1). Dieser Erfahrungsschatz bildet die solide Basis für eine optimale Integration der verschiedenen Verfahren. Er ist auch ein Grund dafür, dass die FGS sich im Rahmen des IERS in den kommenden Jahren als Kombinationszentrum engagieren will.

Institution	VLBI	SLR	LLR	GPS	Altimetrie	Laserkreisel	Gravimetrie
BKG	X	X		X			X
DGFI	X	X		X	X		X
FESG			X	X		X	
GIUB	X			X			
IAPG			X	X			X

Tabelle 4.4.1: Knowhow in der Verarbeitung der verschiedenen Beobachtungstechniken

In der FGS sind zudem bereits seit längerer Zeit die in Tabelle 4.4.2 aufgeführten internationalen Software-Pakete im Einsatz, die SINEX-Dateien oder vergleichbare Dateien erzeugen können. Diese Pakete bilden die Basis für die Bereitstellung von Normalgleichungen für eine nachfolgende Kombination. Dazu wird

allerdings eine generelle Vereinheitlichung der physikalischen Modelle und der Parametrisierungen notwendig sein.

Software-Paket	VLBI	GPS	SLR	LLR	DORIS
CALC/SOLVE	X				
OCCAM	X				
BERNESE		X	(X)		
DOGS			X		
UTOPIA			X		
LUNAR				X	

Tabelle 4.4.2: In der FGS vorhandene Software-Pakete zur Auswertung der Beobachtungen geodätischer Raumverfahren.

Für die Kombination selbst existieren innerhalb der FGS zum Teil selbst entwickelte oder sonst im Einsatz stehende Software-Pakete. Dazu gehören ACCSOL, BERNESE (ADDNEQ) und DOGS-CS. Diese Programme erlauben bereits vielfältige Kombinationen und Manipulationen von Normalgleichungsanteilen. So ist es in den meisten Programmen möglich, eine Vielzahl von Parametertypen zu behandeln (Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten, Erdrotationsparameter, Geozentrumskoordinaten, Troposphärenparameter, ...), für gewisse Fragestellungen unwichtige Parametertypen zu eliminieren/reduzieren, für die verschiedenen Parametertypen a priori Informationen und Bedingungen einzuführen, eine flexible Definition des Datums vorzunehmen, Parametertypen zu glätten und die Messungen lokaler Exzentrizitäten als Normalgleichungsanteile mit einzubringen. Die Kombinationsprogramme sind bereits in vielfältigen Anwendungen in der FGS zum Einsatz gekommen.

### Forschungsziele

Das Forschungsprogramm der FGS hat die langfristige Zielsetzung, sämtliche Parametertypen, die von mindestens zwei Beobachtungstechniken bestimmt werden können, in eine rigorose Kombination einzubeziehen. Die Kombination kann auf Stufen unterschiedlicher Komplexität erfolgen:

- 1) Kombination auf der Ebene einzelner Parametertypen
- 2) Kombination auf der Ebene der Parameter (Normalgleichungen)
- 3) Kombination auf der Ebene der Beobachtungen

Die Kombination und die dazu benötigten Software-Pakete werden von einer Stufe zur nächsten immer anspruchsvoller und komplexer. Auf allen drei Ebenen will die FGS in den nächsten Jahren wesentliche Beiträge erarbeiten.

Auch in Zukunft wird der Vergleich und die Kombination einzelner Parametertypen, die mit unterschiedlichen Beobachtungstechniken bestimmt worden sind (z.B. die Troposphärenzenitverzögerungen von VLBI, GPS und Wasserdampfradiometern), eine wichtige Rolle spielen, sei es auch nur als Vorbereitung für die Erarbeitung von und Einsicht in die komplexeren Kombinationsformen 2) und 3). Zu den Aufgaben, die sich die FGS in diesem Zusammenhang stellt, gehören:

- Vergleich und Kombination von Koordinatensätzen und -serien der verschiedenen Techniken.
- Vergleich und Kombination von Geozentrumsvariationen aus SLR, GPS und Altimetrie.
- Vergleich und Kombination von Erdrotationsparametern der verschiedenen Techniken. Dazu gehören insbesondere auch Serien mit subtäglich zeitlicher Auflösung für die Bestimmung von Ozean-Gezeitenamplituden und Nutationsoffsets und -drifts für die Bestimmung von Nutationsamplituden.
- Der Vergleich (und Kombination) von Troposphärenparametern (Zenitverzögerung und Gradienten) aus VLBI-, GPS- und Wasserdampfradiometerdaten.

Diese einfachen Vergleiche und Kombinationen können mit mehr oder weniger korrekter statistischer Information durchgeführt werden (Berücksichtigung formaler Fehler, Korrelationen, ...), zeigen aber trotz ihrer Einfachheit bereits viele Probleme und Inkonsistenzen zwischen den Techniken auf (Beispiel: Vergleich von SLR-Messungen zu GPS-Satelliten mit aus IGS-Bahnen gerechneten Distanzen).

Neben diesen Untersuchungen einzelner Parametertypen wird in den nächsten Jahren eine korrekte, möglichst alle relevanten Parametertypen umfassende Kombination auf der Stufe der Normalgleichungen angestrebt. Dazu werden die im vorhergehenden Abschnitt aufgezählten Programmpakete verwendet werden. Die konkreten Forschungsziele sind hier:

- Erzeugung von Zeitserien von kombinierten Stationskoordinatenlösungen (z.B. Wochenlösungen) unter Einschluss der Erdrotationsparameter.
- Kombination von Koordinaten und Geschwindigkeiten aus Mehrjahreslösungen.
- Konsistente Realisierung des ICRS, des ITRS und einer dazugehörigen Serie von Erdrotationsparametern.
- Kombination von GPS- und VLBI-Lösungen mit gemeinsamen Troposphärenparametern (z.B. für Einbis Dreitageslösungen).
- Kombinierte Berechnung von Satellitenbahnen.

Für die obigen Kombinationsvorhaben sollen die folgenden Problemstellungen genauer untersucht werden:

- Definition des Datums des terrestrischen Referenzsystems,
- Geeignetes Zeitintervall für die Kombination (täglich, wöchentlich, jährlich),
- Gewichtung der einzelnen Beiträge,
- Varianzanalyse.

Viele dieser Vorhaben decken sich mit den vorgeschlagenen Aktivitäten der FGS im Rahmen des IERS (ITRF, Kombinationszentrum).

Die Schwerefeldmodellierung ist bereits seit langem ein Beispiel für die kombinierte Nutzung verschiedener Raumverfahren. Die Berechnung von präzisen Bahnen geodätischer Satelliten auf der Basis unterschiedlicher Trackingsysteme (GPS, SLR, DORIS), die terrestrischen Schwereanomalien und die durch Altimetrie abgeleiteten Schwereinformationen decken jeweils unterschiedliche Spektralbereiche des Schwerfeldes ab. Dabei werden neben den Schwerfeldkoeffizienten (einige davon mit Änderungsraten), die Stationskoordinaten der Trackingstationen, die Gezeiten der festen Erde, ausgewählte Tiden der Meeresgezeiten, Erdrotationsparameter, sowie Modelle der stationären Meerestopographie geschätzt. Die Kombination hochauflösender Raumverfahren (wie der Altimetrie) mit den aus Satellitenbeobachtungen abgeleiteten relativ niedrig gradigen Schwerefeldmodellen wird bisher nicht streng, sondern (wie bei dem Modell EGM96) nur näherungsweise vollzogen.

Mit den neuen Schwerefeldmissionen (CHAMP/GRACE/GOCE) wird sich nicht nur das spektrale Auflösungsvermögen erheblich verbessern, sondern auch die Möglichkeit eröffnen, die zeitliche Variationen des Schwerfeldes zu modellieren. Dadurch werden sich die Anforderungen an die Kombination nochmals stark erhöhen. Die gestiegene Messgenauigkeit erfordert nämlich eine verfeinerte Modellierung durch die sich noch wesentlich komplexere Kombinationsmöglichkeit eröffnen, z.B. bei der Kombination von Parametern des terrestrischen Referenzsystems und der Erdrotation mit Parametern des Schwerfeldes der Erde. Diese ambitionöse Integration wird jedoch noch einige Zeit auf sich warten lassen. In naher Zukunft werden hauptsächlich getrennte Ansätze (separate Behandlung von Parametern, die die Referenzsysteme und solchen, die das Schwerfeld betreffen) verwendet werden wie z.B. die kinematische Bestimmung von Positionen und Positionsdifferenzen von LEOs (Low Earth Orbiters) mit GPS mit als bekannt angenommenen Stationskoordinaten, Erdrotationsparameter und GPS-Bahnen und die Verwendung dieser Positionen und Positionsdifferenzen für die anschließende Bestimmung von Schwerfeldparameter.

Eine strengere Kombination der Ergebnisse der neuen Schwerefeldmissionen mit der Altimetrie soll mit dem Ziel untersucht werden, den Entwicklungsgrad der Schwerefeldmodelle weiter zu erhöhen und die Fortsetzung nach unten zu stabilisieren. Die integrierte Behandlung von Schwerefeld-parametern ist bereits in Abschnitt 4.3 erörtert worden.

## **Software-Entwicklungen**

Um eine rigorose Kombination der Daten der verschiedenen Raumverfahren zu realisieren, sind für die nächsten Jahre grössere Entwicklungsarbeiten im Software-Bereich geplant. Dabei geht es insbesondere darum, die vorhandenen Softwarepakete (siehe Tabelle 4.4.2) für die Auswertung der Beobachtungen zu vereinheitlichen. Folgende Schritte sind vorgesehen:

- Bestandaufnahme der Softwarepakete: Welche physikalischen Modelle werden verwendet? Welche Parametertypen können geschätzt werden, und wie sieht ihre zeitliche Darstellung aus? Wie kann der Austausch von Normalgleichungen oder vergleichbarer Information erfolgen für sämtliche Parameter, die sinnvollerweise kombiniert werden können?
- Erarbeiten gemeinsamer Standards für die verwendeten Konstanten und die physikalische Modellierung (IERS Conventions), für die einheitliche Parametrisierung und für den Austausch von Normalgleichungen (SINEX) und anderen Informationen.
- Anpassung der geeigneten Auswerte-Softwarepakete und der Kombinationssoftwarepakete an diese Standards und Formate.
- Entwicklung von Kombinationsstrategien anhand reeller Daten.

Ideal wäre in diesem Zusammenhang ein Programmsystem, das sämtliche Beobachtungstypen verarbeiten könnte, da dadurch automatisch die Konsistenz der Modelle und der Parametrisierung garantiert würde. Es hätte ferner den Vorteil, dass die Schätzung von zeitlich hochaufgelösten oder gar stochastischen Parametern relativ einfach möglich wäre (z.B. gemeinsame stochastische Bestimmung der Troposphärenkorrekturen aus VLBI- und GPS-Daten). Die Entwicklung eines solchen Programmsystems bedeutet jedoch einen Einsatz von vielen Mannjahren und ist deshalb als langfristiges Ziel der FGS zu sehen. Die FGS wird sich zuerst auf die Stufe der Normalgleichungen konzentrieren, da diese Kombinationsebene bereits viele zentrale Fragen aufwirft. Falls sich die Resultate dieser Kombination als sehr fruchtbar erweisen, wird man als nächsten Schritt die Kombination auf der Beobachtungsebene anstreben.

## 4.5 Fundamentalstationen Wettzell, TIGO und O'Higgins

Voraussetzung für Forschungsbeiträge zur

1. hochgenauen Positionsbestimmung
2. hochgenauen Bestimmung der Erdrotation
3. hochgenauen Gravitationsfeldbestimmung

ist die Bereitstellung von Observablen, die auf global verteilten Beobachtungsstationen kontinuierlich erfasst werden und die für verschiedene Fragestellungen sensitiv sind. International haben sich für die relevanten geodätischen Raummessverfahren Dienste etabliert, die über weltweite Beobachtungsnetze, Datenverbindungen und Analysezentren verfügen und koordiniert Daten und Produkte bereitstellen. Zu nennen sind die im Rahmen der IAG etablierten Dienste wie

der International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS),  
der International Laser Ranging Service (ILRS) und  
der International GPS Service (IGS).

Es läuft bereits ein Pilotprojekt zum DORIS Messverfahren, mit dem Ziel, auch für DORIS einen weltweiten Dienst international einzurichten. Eine Zusammenführung der Ergebnisse der einzelnen Dienste wird durch einen weiteren Service, dem Internationalen Earth Rotation Service (IERS) zu einem Gesamtergebnis kombiniert.

Die Beobachtungsstationen des IVS , ILRS und IGS werden in ihrer Gesamtheit als International Geodetic Space Network (IGSN) zusammengefasst, wobei Richtlinien und Standards festgelegt sind, um die Klassifizierung der Stationen festzulegen. Die wichtigsten Stationen in diesem Verbund sind Stationen, auf denen möglichst viele Messverfahren vorhanden sind, geodätische Raummessverfahren und lokale Messverfahren, die kontinuierlich aktiv Beobachtungsdaten bereitstellen. Stationen, die über VLBI-, SLR/LLR- und GPS-Messverfahren verfügen, werden unter dem Begriff Fundamentalstation zusammengefasst. Konsequenterweise wurde der Gedanke der Fundamentalstationen in der FGS seit vielen Jahren verfolgt und realisiert.

### Fundamentalstation Wettzell

Anfang der siebziger Jahre wurde die Station Wettzell als Satellitenbeobachtungsstation errichtet. Im Rahmen des SFB 78 wurde für ihren weiteren Ausbau das Konzept einer Fundamentalstation für Forschungsvorhaben mit vorwiegend geodynamischer Zielsetzung entwickelt und in den achtziger Jahren im SFB 78 und nach dessen Beendigung in der FGS konsequent umgesetzt. Die wesentlichen Ausbauschritte waren:

- die Errichtung des 20 m-Radioteleskops für radiointerferometrische Messungen (Fertigstellung 1983),
- der Bau des Modulare Transportable Laserentfernungsmesssystems MTLRS-1 (Fertigstellung 1984),
- die Ablösung des GTE-Sylvania Laserentfernungsmesssystems durch das Wettzell Laser Ranging System WLRS (operationeller Messbetrieb mit WLRS ab 1991),
- die Erweiterung des Zeitsystems durch GPS-Zeitempfänger, Cs-Atomfrequenznormale und H-Maser,
- die Errichtung permanent beobachtender GPS-Stationen, die heute im Rahmen von IGS (1993), EUREF und GREF (SAPOS) genutzt werden,
- Bau eines Gravimeterhauses und Betrieb eines Supraleitenden Gravimeters (1987),
- die Inbetriebnahme eines Langwellen-Seismographen im Rahmen des Seismologischen Regionalnetzes (1991),
- die Errichtung und der Bezug eines Betriebsgebäudes und Nebengebäudes mit Aufenthaltsraum und Garagen (bezogen 1991),
- die Neugestaltung des Stationsgeländes (Verkehrsflächen, Parkraum, Kabelkanäle) (1992 Fertigstellung),

- die Inbetriebnahme einer PRARE-Messstation (Precise Range and Range Rate Equipment), die experimentelle Messdaten zur Bahnbestimmung von METEOR3, einem russischen Satelliten, lieferte (1993) und Messdaten zur Bahnbestimmung von ERS2 liefert,
- die Erweiterung und Neuvermessung der geodätischen Lage-, Höhen- und Schwerenetze (letzte Messung 1996).

Seit 1992 wird der Bau des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums verfolgt, das die Rolle einer Fundamentalstation auf der Südhalbkugel übernehmen soll. Mit dem Bau eines hochempfindlichen Drehgeschwindigkeitssensors, einem Laserkreisel, wurde in 1999 begonnen.

Die Auslastung der Systeme durch einen 24-Stunden-Messbetrieb sowie die Entwicklung der neuen Systeme machte eine personelle Aufstockung auf 32 Bedienstete erforderlich.

Mit den kollokierten Messsystemen für VLBI, SLR/LLR und den GPS-Messungen ist die Fundamentalstation Wettzell (Abbildung 4.5.1), unterstützt durch lokale Beobachtungen, heute die herausragende Station im ISGN. Die Beobachtungen stehen über die Internationalen Dienste zuverlässig zur Verfügung.



Abbildung 4.5.1: *Fundamentalstation Wettzell*

### **Transportables Integriertes Geodätisches Observatorium (TIGO)**

Seit 1992 wird das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (Abbildung 4.5.2) verwirklicht, eine transportable Fundamentalstation, mit vergleichbaren Funktionen wie die Station Wettzell, die zur Verbesserung des globalen Netzes auf der Südhalbkugel eingesetzt werden soll. TIGO ist weitgehend fertiggestellt, ein erster Messeinsatz ist ab Anfang 2001 in Südamerika vorgesehen. TIGO beinhaltet die folgenden Messmodule

- VLBI-Module, bestehend aus einem 6 m Offset Radioteleskop und der MK-IV-Datenregistrier-einrichtung,
- SLR Modul, mit einem leistungsfähigen optischen Teleskop (50 cm-Öffnung), einem Titan Saphir Laser und einem ps-genauen Laufzeitmesssystem,
- Grundmodul I, bestehend aus einem Zeit/Frequenzsystem, GPS-Empfängern, Gravimeter, Seismometer, meteorologische Sensoren,

- Grundmodul II, bestehend aus Notstromversorgungssystem, Sozialraum und Werkstätten,
- Energiemodul zur Stromversorgung in strukturschwachen Regionen.

## O'Higgins

Auf der antarktischen Halbinsel wurde in O'Higgins ein geodätisches Observatorium (Abbildung 4.5.3) eingerichtet, das über

- ein 9 m-Radioteleskop für temporäre VLBI Beobachtungen,
- eine permanente GPS Station,
- eine PRARE Station,
- meteorologische Beobachtungssysteme und über
- Pegelmesssysteme

verfügt. Aus logistischen Gründen können auf der Station O'Higgins nur saisonbedingt VLBI-Beobachtungen durchgeführt werden.

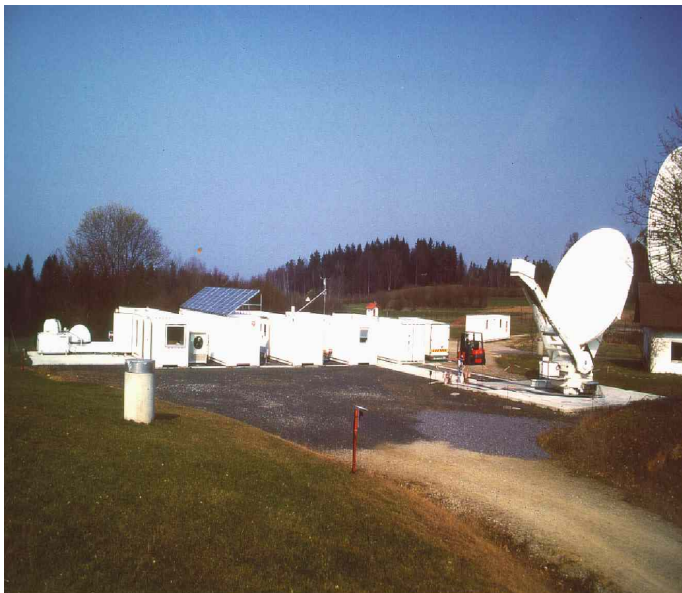


Abbildung 4.5.2: *Transportables Integriertes Geodätisches Observatorium (TIGO)*



Abbildung 4.5.3: *Geodätisches Observatorium O'Higgins*

### 4.5.1 Einsatz der Fundamentalstation Wettzell

Die Fundamentalstation Wettzell ist eingebunden in eine Reihe international koordinierter Messprogramme, vorwiegend mit der Zielsetzung, die globalen Referenzsysteme zu stützen und Beiträge zur Erdrotation, Plattentektonik, Aufbau globaler/regionaler geodätischer Punktfelder und Vermarkung extraterrestrischer Bezugssysteme zu liefern.

Seit 1983 ist die Empfangsanlage für **Radiointerferometrie (Very Long Baseline Interferometry (VLBI))** operationell. Die regelmäßige Beteiligung an Experimenten zur Bestimmung der Erdrotationsparameter wie

- NEOS-A (wöchentlich 24 Stunden, früher IRIS A),
- NEOS-B (monatlich 1 x 24 Stunden),
- IRIS-S (monatlich 1 x 24 Stunden),

- Intensive (täglich über 1 Stunde),
- CORE (24 Stunden Messungen, montags, dienstags, tlw. mittwochs, künftig Ablösung der NEOS-Experimente)

an Experimenten zur Bestimmung von Krustenbewegung wie

- R&D (1 x monatlich über 24 Stunden),
- GLOBAL (vierteljährlich 36 Stunden),
- X-ASIA (vierteljährlich 36 Stunden),
- EUROPE (2-monatlich)

sowie gelegentlich an radioastronomischen Experimenten, führte zu einer sehr hohen Auslastung des Teleskopes.

Das Radioteleskop Wettzell spielt in allen geodätisch-geodynamischen Programmen aufgrund der kontinuierlichen Beteiligung eine besonders herausragende Rolle im Hinblick auf Kontinuität der Messreihen und durch die Kollokation mit anderen Techniken im Hinblick auf Komplementarität. Um das auch zukünftig sicherzustellen, sind neben der Grundwartung grundlegende Systemverbesserungen geplant, die sowohl den Messbetrieb als auch die Betriebssicherheit deutlich verbessern. Gedacht ist in erster Linie, das System im MK-IV-Beobachtungsmodus zu betreiben, die Automatisierung voranzutreiben, dass auch ohne zusätzliches Personal vermehrt an Samstagen, Sonn- und Feiertagen insbesondere weitere CORE-Experimente mitbeobachtet werden können und eine Echtzeitdatenübertragung einzurichten, um die Transportzeiten für die Magnetbänder zum Korrelator zu vermeiden.

Für stationäre Laserentfernungsmessungen steht das **Wettzell Laser Ranging System (WLRS)** auf der Fundamentalstation Wettzell zur Verfügung.

WLRS wurde im Jahre 1991 in den Routineeinsatz übernommen und hat damit das GTE-Sylvania System abgelöst. Wesentliche Merkmale des neuen Systems sind

- Messungen auch bei Tageslicht,
- Normalpointgenauigkeit wenige mm,
- hohe Datenrate,
- anmessbare Ziele: alle Satelliten auch über den geostationären Orbit hinaus bis hin zum Mond,
- die Möglichkeit der Ausdehnung der Messungen auf den infraroten Spektralbereich.

WLRS wird an ca. 350 Tagen im Jahr im 24-Stundeneinsatz betrieben.

Konzeptionell wurde das WLRS so angelegt, dass parallel zum Routinebetrieb Experimente ausgeführt werden können, ohne dass in den Systemaufbau eingegriffen werden muss. So war es möglich, dass andere Detektorschaltungen entwickelt und hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit untersucht werden konnten. Auf diese Weise wurden Lawinenphotodioden für den Routineeinsatz und für die simultanen Messungen auf zwei Wellenlängen vorbereitet. Es wurde der mechanische Aufbau des Detektionsbereiches der Anlage neu gestaltet und eine Streackamera integriert. Altersbedingt wurde der Nd:Yag Laser erneuert, das gesamte Steuersystem und Laufzeitmesssystem ausgetauscht, so dass heute ein hochmodernes und sehr leistungsfähiges System zur Verfügung steht.

Für den mobilen Einsatz von Laserentfernungsmessungen nach Satelliten stand das **Modulare Transportable Laser Ranging System MTLRS-1** zur Verfügung. MTLRS-1 wurde seit 1984 operationell im Rahmen internationaler Forschungsprojekte zur Erfassung von Krustenbewegungen eingesetzt.

In den letzten Jahren wurde die Hardware von MTLRS-1 überarbeitet und technisch auf den neuesten Stand gebracht. Es wurde das Lasersystem und das Empfangssystem komplett ersetzt. Das Ziel, die Messgenauigkeit von 3 cm auf 0,5 cm zu steigern, wurde erreicht. Im Hinblick auf künftige Messvorhaben



wurde das Transportkonzept mit dem LKW und dem Stromgenerator als Nachläufer überarbeitet. Die MTLRS-1 Kabine und der Stromgenerator wurde auf einem Auflieger montiert, der von einer Sattelzugmaschine gezogen wird. Bedingt durch die Feldeinsätze unter den extremen äußeren Bedingungen war es weiterhin erforderlich, die komplette Elektronik und Steuereinheit zu ersetzen. Diese Arbeit wurde vergeben, der Auftragnehmer war jedoch nicht in der Lage ein Kontrollsystem zu liefern. Diese Arbeiten stehen nunmehr noch an.

Da mobile Einsätze mit MTLRS unwirtschaftlich geworden sind - mit GPS können Positionen einfacher und kostengünstiger bestimmt werden - sollte MTLRS stationär eingesetzt werden, um eine Lücke im IGSN zu füllen. Hierzu ist ein Gastland zu finden, das bereit ist bei der Integration eines neuen Kontrollsystems mitzuwirken. Die Entwicklungen und Erfahrungen, die insbesondere bei der Eigenentwicklung der Kontrollsysteme für WLRS und für das TIGO SLR-Modul gewonnen wurden, müssen einfließen und auf MTLRS-1 übertragen werden.

**Satellitengestützte Navigationssysteme**, wie das **GPS** spielen heute bei der Bestimmung der Positionen und Bewegungsvektoren eine bedeutende Rolle. Die Messungen werden im Mikrowellenbereich durchgeführt und können somit bei allen Wetterlagen erfolgen. Die Verfahren zeichnen sich durch hohe Genauigkeit, auch über große Entfernungen, aus sowie durch wirtschaftliche Erfassung der Messdaten. Mit Abschluss der Ausbauphase (Anfang der 90er Jahre) finden GPS-Verfahren - obwohl GPS ein militärisches System ist und damit im zivilen Bereich Einschränkungen unterworfen ist - Anwendung im wissenschaftlichen Bereich (geodynamische Netze), als auch im praktischen Bereich (Landesvermessung). GPS kann sowohl statisch als auch dynamisch genutzt werden.

Das von der ehemaligen UdSSR entwickelte Navigationssystem **GLONASS** hat inzwischen Bedeutung gewonnen. Im Rahmen der CSTG wurde ein Pilotprojekt gestartet, das GLONASS mit GPS integriert und heute im Rahmen von IGS mit in die Analysen einbezogen wird.

**PRARE** ist ein geeignetes Verfahren zur Bahnvermessung. Es wurde jedoch nur bei der Bahnbestimmung des ERS-2 eingesetzt und wird künftig keine Bedeutung mehr haben.

Das in Frankreich entwickelte **DORIS** hat bedingt durch eine gute globale Verteilung der Beobachtungsstation auch im Rahmen der Arbeiten des IERS an Bedeutung gewonnen. Es wird derzeit an einer 3. Generation DORIS gearbeitet. Hier wird es für die Fundamentalstation Wettzell notwendig werden, im Sinne der Kollokation mit anderen Systemen, auch einen DORIS 3<sup>rd</sup> Generation Empfänger einzusetzen und zu betreiben.

Seit 1987 wird auf der Station Wettzell eine permanente GPS-Station betrieben. Zunächst war sie in das Cooperative International GPS-Net (CIGNET) eingebunden, das heute in das globale Netz des Internationalen GPS-Service (IGS) integriert ist. Die Fundamentalstation Wettzell ist heute auch in EUREF- und GREF-Netze eingebunden. Aus Redundanzgründen stehen GPS Beobachtungen mit TURBO ROGUE-, ASHTECH- und TRIMBLE- Empfängern zur Verfügung. Neben den GPS Messungen werden auch die GLONASS-Satelliten mit ASHTECH Z18-Empfängern beobachtet. Wettzell kommt hierbei die wichtige Rolle einer Core-Station zu. IGS-Ergebnisse sind hochgenaue Ephemeriden für die GPS- und GLONASS-Satelliten, Rotationsparameter der Erde, sowie Parameter zur Refraktionsberechnung (Atmosphäre, Ionosphäre).

Um insbesondere Bereiche in Asien oder die Antarktis mit einzubeziehen wurden weitere permanente GPS-Stationen eingerichtet in Lhasa/Tibet, O'Higgins/Antarktis und Reykjavik/Island. Weitere Verdichtungsstufen durch regionale und lokale Netze sind erfolgt. Im Sinne von IGS haben regionale Netzwerke kontinentale Ausdehnung, lokale Netze überdecken Gebiete wie z. B. die Bundesrepublik Deutschland. Über diese Verdichtungsstufen kann zum einen regionsspezifischen geodynamischen Fragestellungen nachgegangen werden, zum anderen realisieren sie sehr genau regionale Referenzsysteme ("aktives Referenznetz") für wissenschaftliche Aufgaben als auch für Aufgaben der Landesvermessung. Im Bereich von Europa wurde ein regionales Netz von 70 permanent beobachtenden Stationen (EUREF) aufgebaut,

ebenso ein lokales Netz auf dem Gebiet der Bundesrepublik mit über 20 Stationen (GREF), die in die Vorhaben der Landesvermessungsämter integriert sind (SAPOS).

Ziel beider Netze ist es, Zeitreihen der aktuellen ITRF-Koordinaten für die Referenzstationen abzuleiten, um zeitliche Veränderungen zu bestimmen und deren Ursache zu analysieren. Verstärkt wird daran gearbeitet die Messungen auch für atmosphärische Untersuchungen zu nutzen. Hierzu werden möglichst aktuelle Auswertungen erforderlich sein, die echtzeitnahe Beobachtungsdaten ausgewählter Stationen benötigen.

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

- die Zeit- und Frequenzhaltung,
- 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 in dem Arbeitsbereich "Allgemeine Dienste" zusammengefaßt.

Das **Zeit- und Frequenzsystem** der Station Wettzell umfaßt drei Cäsium-Atomuhren zur Generierung der Zeitskala UTC (Wettzell) und drei H-Maser für die Bereitstellung hochgenauer Referenzfrequenzen. Eine Anbindung der örtlichen Zeitskala UTC (Wettzell) an die Weltzeitskala UTC geschieht mit Zeit-GPS-Empfängern. Das Zeitsystem der Station leistet seit über 20 Jahren einen aktiven Beitrag zur Generierung der Weltzeitskala UTC durch Bereitstellung seiner Zeitmessdaten. Als Basisdienst für die Station Wettzell ist geplant, diese Arbeiten künftig fortzusetzen und durch stete Verbesserungen den wachsenden Anforderungen an die Messverfahren selbst anzupassen. Die Bereitstellung der Zeitmessdaten muss zukünftig durch den "online"-Zugriff mit Hilfe von Internet ermöglicht werden; entsprechende Datenorganisationen sind aufzubauen.

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. Die Kombination der meteorologischen Daten mit den geodätischen Raumverfahren, besonders mit den GPS-Messungen und mit den Zweifarben-Laserentfernungsmessungen, verspricht künftig den Einfluß der Refraktion genauer zu erfassen. Auch hier ist es unabdingbar, diese Messreihen fortzuführen und den künftigen Anforderungen anzupassen.

Die meteorologischen Daten und die Messungen der Wasserdampfradiometer sind für den direkten Zugriff in Echtzeit durch die Messsysteme der Station Wettzell und für den "online"-Zugriff über Internet aufzubereiten und in geeigneten Organisationsstrukturen vorzuhalten.

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,

- ein Umgebungsnetz mit einer Ausdehnung von 25 km x 25 km,
- ein Gravimeternetz.

Das lokale Netz dient der Einmessung der Messsysteme und der Ableitung von Zentrierwerten. Das Umgebungsnetz ist angelegt worden, um evtl. auftretende lokale Veränderungen in Lage und Höhe festzustellen. Das gravimetrische Netz unterstützt insbesondere die Aufdeckung von vertikalen Veränderungen. Alle Netze werden regelmäßig beobachtet. Es ist beabsichtigt, die Netze auch in Zukunft wiederholt zu vermessen, sowie auf ausgewählten Punkten die Netzstabilität durch kontinuierliche GPS-Registrierungen zu überwachen.

Mit einem **Supraleitenden Gravimeter** werden relative Schwereänderungen erfasst. Diese Messgröße gibt insbesondere sehr genauen Aufschluß über lunare und solare Gezeiten. Die Messdaten des Supraleitenden Gravimeters sind zukünftig für einen direkten Zugriff über Internet aufzubereiten und entsprechend bereitzustellen.

**Seismographische Beobachtungen** werden seit über 25 Jahren auf der Station in Zusammenarbeit mit dem Geophysikalischen Observatorium Fürstfeldbruck der Universität München durchgeführt. Hier ist auch beabsichtigt, diese Messreihe mit dem im Rahmen eines DFG-Projektes beschafften Seismographen fortzuführen.

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 Betriebssicherheit und unzureichender Unterstützung durch Hersteller und Lieferanten, entwickelt sich diese Arbeit zu einer sehr aufwendigen Tätigkeit. Die Messsysteme auf der Station, die sich alle auf Systemrechner stützen und weitgehend automatisiert sind, erfordern eine stetige Laufendhaltung und Ergänzung der Systemrechner, sowohl hinsichtlich der Hardware als auch hinsichtlich der Software. Die Messdaten dieser Basisdienste werden teilweise in Echtzeit, d. h. während der Messdurchführung von den übrigen Messsystemen benötigt. Als typische Beispiele seien die meteorologischen Daten und Daten des Zeit- und Frequenzsystems genannt. In zunehmendem Maße zeigt sich, dass die von den unterschiedlichen Messsystemen gewonnenen Daten in den verschiedensten Kombinationen für Auswertezwecke benötigt werden. Als Beispiel sei hier die Kombination der GPS-Daten mit den meteorologischen Daten. Es ergibt sich die Notwendigkeit, einige Daten für den Echtzeitzugriff zu organisieren und eine Reihe von Messdaten der Station Wettzell für den direkten "online"-Zugriff aufzubereiten, bzw. vorzuhalten und Zugriffsmöglichkeiten über "Anonymous FTP" und WWW einzurichten. Für den weiteren Ausbau der Station sind entsprechende datenmäßige Organisationsstrukturen zu schaffen, die diese Grunddienste entsprechend bereitstellen, organisieren und verwalten.

## 4.5.2 Entwicklung der Fundamentalstation Wettzell

Die Messsysteme der Fundamentalstation Wettzell müssen entsprechend den technischen Möglichkeiten weiterentwickelt werden, um den Anforderungen der internationalen Messprogramme gerecht zu werden.

Die geodätisch geodynamischen Forschungsprogramme werden auch künftig **radiointerferometrische Messungen** einbeziehen. Sie liefern heute und auch in absehbarer Zukunft die genauesten Ergebnisse zur Laufendhaltung der Referenzsysteme, zur Anbindung der terrestrischen Referenzsysteme an extraterrestrische Referenzsysteme und zur Plattentektonik in globalen Netzen. Ebenso ist die **Very Long Baseline Interferometrie (VLBI)** ein bedeutendes Bindeglied zu den astronomischen und astrophysikalischen Fragestellungen (Nutation, Präzession, Relativitätstheorie). Künftig muß man sich verstärkt im Rahmen des IVS an CORE Projekten beteiligen. Mit CORE ist beabsichtigt kontinuierlich die Erdrotationsparameter zu bestimmen, d.h. man plant die vorhandenen Radioteleskope in 7 Netzwerke zu organisieren, die abwechselnd jeweils an einem Wochentag Experimente beobachten und somit eine kontinuierliche EOP-Bestimmung erlauben. Bisher sind drei Netzwerke etabliert, im Jahr 2001 wird ein viertes hinzukommen, so dass bereits an den Wochentagen von Montag bis Donnerstag durchgehend

beobachtet werden kann. Problematisch ist derzeit die Organisation der Beobachtungen an den Wochenenden. Hierzu ist es zwingend erforderlich den Messablauf zu automatisieren.

Radiointerferometrische Beobachtungen stellen den unmittelbaren Bezug zwischen den globalen Bezugssystemen, dem ICRF und dem ITRF her. GPS/GLONASS Applikationen setzen die Verfügbarkeit eines Inertialsystem (ICRF) voraus. Es hat sich gezeigt, dass durch die Repräsentation des Inertialsystems durch die Bahn der GPS-Satelliten und insbesondere durch die Bewegung des Phasenzentrums der Satellitensendeantennen systematische Abweichungen auftreten, die die Genauigkeit der Methoden deutlich übersteigen und verbessert werden müssen. Mit Hilfe von VLBI-Beobachtungen gleichzeitig zu den GPS Satelliten könnten derartige Fehlerquellen aufgedeckt werden. Im Rahmen der Dienste IVS, IGS und ILRS etabliert sich eine Arbeitsgruppe, die Vorschläge erarbeitet, wie diese Problematik gemeinsam geklärt werden kann. Neben den analytischen Überlegungen sind auch technische Konzepte zu erarbeiten, die Parallelbeobachtungen sowohl zu Quasaren als auch zu GPS Satelliten zulassen.

Die VLBI-Methode liefert bereits jetzt - wie die R&D-Ergebnisse zeigen - eine Messgenauigkeit globaler Basislinien von unter 1 Zentimeter. Einflüsse, wie Auflasteffekte durch Meeresgezeiten oder Luftdruck auf die Erdkruste, sind ohnehin schon zu berücksichtigen. Lokale Veränderungen der Antenne, z. B. die Antennenhöhe durch thermische Ausdehnung, erreichen bereits eine Größenordnung, die die Messungen beeinflussen. Diese Ausdehnungen sind kontinuierlich zu erfassen.

Im Bereich der Datenregistrierung wird derzeit, im Gesamtverbund der VLBI-Stationen, von den sogenannten MK-III- auf das MK-IV-Registriersystem umgerüstet. Die Vorteile von MK-IV sind eine höhere Datenaufzeichnung und eine größere Bandbreite. Beides führt zu einer noch höheren Messgenauigkeit. In Verbindung mit der optischen Datenübertragung, die künftig auch die Übertragung größter Datenmengen erlaubt, wird es möglich sein, VLBI in Echtzeit für ausgewählte Messprogramme - vorwiegend im Bereich der Erfassung der Erdrotation - durchzuführen. Ziel ist es, dabei zunächst die Übertragungszeit der VLBI-Messdaten zum Korrelator drastisch zu verringern bzw. die Beobachtungen bereits während der fortlaufenden Messung zu korrelieren (echtzeitnah).

Folgende Vorbereitungen für Realtime-VLBI-Anwendungen sind zu treffen:

- Schaffung einer Datenübertragungsinfrastruktur zwischen Wettzell, wenigstens einer weiteren Station und einem Korrelator (Anschluß an die "Datenautobahn"),
- Entwicklung geeigneter Schnittstellen und Datenpuffer zwischen MK-IV und Korrelator,
- Entwicklung des automatisierten Datenflusses.

Als Vorteile der direkten Datenübertragung werden gesehen

- die schnelle Bereitstellung der Erdrotationsparameter für die Bahnbestimmung der Navigationssatelliten (GPS/GLONASS) und künftig für die Satelliten des geplanten GNSS (Global Navigation Satellite System),
- die Vermeidung des durch Aufzeichnen und Wiederabspulen entstehenden Qualitätsverlusts der beobachteten Radiosignale,
- Einsparung teurer Magnetbänder und der Organisation des aufwendigen Transports der Magnetbänder.

Das 20 m-Radioteleskop der Station Wettzell ist in alle geodätischen Experimente, die von den führenden europäischen und amerikanischen Institutionen mit MK-IV-Datenregistrierung organisiert und beobachtet werden, eingebunden. Die Station Wettzell spielt heute schon eine verbindende Rolle zu den asiatischen Gruppierungen, die im Rahmen des Asian-Pazifischen-Teleskop-Netzes kooperieren. Hier ist in Zusammenarbeit mit dem CRL-Japan bereits die Integration des von den Japanern entwickelte K-4-System erfolgt, das insbesondere in Japan und China im Einsatz ist. Das K-4-System ist nur bedingt kompatibel mit dem amerikanischen MK-IV. Die technischen Kenndaten sind jedoch vergleichbar. Im Rahmen des IVS wird an einer Standard Schnittstelle gearbeitet, die weltweit eine Zusammenarbeit der verschiedenen Aufzeichnungssysteme zuläßt. Ein derartiges Standardinterface ist zu integrieren.

Die Einbindung der radiointerferometrischen Empfangsanlagen der FGS (20 m-Teleskop Wettzell, 9 m-Teleskop O'Higgins, TIGO) in langfristig angelegte, kontinuierlich beobachtende Programme, die international koordiniert sind, ist aufrecht zu erhalten und weiter auszubauen. Hierzu ist stets eine technische Weiterentwicklung der Anlagen erforderlich, um eine hohe Messbereitschaft und einen hohen Qualitätsstandard sicherzustellen.

Die Systemverbesserungen in der VLBI Messanlage wie

- Echtzeitanbindung,
- Automatisierung des Messablaufs,
- Integration der verschiedenen Aufzeichnungssysteme und des Standardinterface,
- die zusätzlichen Steigerungen der Auslastung im Rahmen von CORE,
- Parallelbeobachtung von Quasaren und Navigationssatelliten (GPS/GLONASS)

erfordern wesentliche Einschnitte in das vorhandene VLBI System. Es ist geplant, eine Konzeptstudie zur Realisierung einer VLBI-Messanlage durchzuführen, mit deren Hilfe die Systemverbesserungen bzw. Erneuerungen effektiv und wirtschaftlich in den Folgejahren eingebracht werden können.

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, ERS-1, TOPEX-POSEIDON, METEOSAT-1, METEOR-3, dem GPS-SV-35 und den GLONASS-Satelliten, werden auch künftig weitere Satelliten mit Reflektoren ausgerüstet sein, um die Satellitenbahn genau bestimmen zu können. Dies ist für viele Anwendungen Voraussetzung. Die Kombination mit Lasermessungen ermöglicht eine zweifelsfreie Kalibrierung und die Trennung miteinander korrelierter Fehler (z. B. GPS: Rangingfehler und Uhrenfehler).

Künftig wird auch die **Entfernungsmessung zum Mond** als Bindeglied an Bedeutung gewinnen, um übergreifende Fragestellungen in den Grenzbereichen Geodäsie und Astrophysik zu klären (Raumkrümmung, Veränderung der Gravitationskonstante ...).

Die Nutzung der genauen Laserentfernungsmessungen stößt heute an die Leistungsgrenze. Die Refraktionsmodelle liefern nicht mehr ausreichend genaue Korrektionswerte. Laserentfernungsmessungen auf zwei oder mehreren Wellenlängen werden es erlauben, den Refraktionsanteil der Atmosphäre direkt zu messen.

Ziel ist es daher,

- einen hohen Automatisierungsstand zu erreichen, um mit minimalem Personalaufwand eine hohe Messbereitschaft (24 Stunden) zu gewährleisten,
- einen Messbereich von niedrig fliegenden Satelliten bis hoch fliegenden Satelliten, wenn möglich bis zum Mond zu gewährleisten,
- eine äußere Messgenauigkeit besser als einen Zentimeter zu garantieren,
- die Nutzung von für die zusätzliche Bestimmung des Refraktionsanteils zu ermöglichen (Dispersionsmessungen im Submillimeterbereich) und
- die Konzeption eines ps-genauen Laufzeitmesssystems.

Während der Einsatz mobiler Laserentfernungsmesssysteme zur Positionsbestimmung im Rahmen geodynamischer Netze mehr und mehr durch die Nutzung der GPS-Systeme verdrängt wurde, sollten heute mobile Laserentfernungsmesssysteme stationär eingesetzt werden, um Lücken in der globalen Netzverteilung der Laserstationen nach Bedarf zu schließen.

Die Laserentfernungsmessung zu Satelliten muß um den Refraktionsanteil der Atmosphäre korrigiert werden. Hierzu wird im allgemeinen das Modell von Marini und Murray verwendet, welches die meteorologischen Parameter Luftdruck, Feuchte und Temperatur am Orte des Messsystems zur Bestimmung

dieser Korrektur verwendet. Der Vergleich dieses Modells mit den Messungen durch Radiosondenballonaufstiege zeigt eine gute Übereinstimmung. Jedoch verbleibt ein Unsicherheitsbereich von 1 bis 5 cm, wobei über die zugrunde liegenden Mechanismen noch keine Klarheit besteht. Im Rahmen der experimentellen Entwicklung der im infraroten Spektralbereich nutzbaren Detektoren wurden viele Simultanentfernungsmessungen zu Satelliten durchgeführt und der gemessene Dispersionsbeitrag mit den Modellerwartungen verglichen. Der erwartete Unsicherheitsbereich konnte bestätigt werden, jedoch ist zu dem gegenwärtigen Zeitpunkt keine Ursache dafür identifizierbar. Diese Arbeiten sollen weitergeführt werden. Dabei ergeben sich folgende Arbeitsfelder:

- Routineetablierung von "Zweifarbennmessungen" auf der Basis von Halbleiterdetektoren,
- Ausdehnung der Routinemessungen auf eine Streackamera. Dieser Detektor hat eine sehr hohe zeitliche Auflösung, welche zur Messung des Dispersionsbeitrages herangezogen werden kann,
- Erweiterung des Systems auf andere Ansätze. Dies könnte die Nutzbarmachung eines weiteren Lasers (TiSaphir), der auf anderen Spektralbereichen arbeitet, oder auch den Einsatz von Ramanstreuung zur Frequenzverschiebung beinhalten,
- Modellierung der Messungen.

WLRS wurde Mitte der 80er Jahre konzipiert. Während die Hardwarekomponenten im Laufe der Jahre z. T. erneuert wurden, ist jetzt erst mit der **Erneuerung der Steuersoftware** begonnen worden. Das grundlegende Konzept wurde bereits umgesetzt und konnte mit Beginn des Jahres 2000 erfolgreich erprobt werden. Verbesserungen, die zum einen einen sicheren Routinebetrieb erlauben, zum anderen den automatischen Messablauf deutlich verbessern sind noch anzustreben.

WLRS ist bedingt durch seinen modularen Aufbau eine ideale Plattform, um Experimente durchzuführen, ohne dass der Routinemessbetrieb gestört werden muß. Es ist geplant, weitere neue Detektoren zu erproben, und ihren Einsatz für verschiedene Zwecke zu optimieren. Die Arbeiten zielen insbesondere darauf ab, hochempfindliche **Detektorschaltungen** für die Entfernungsmessung zum Mond und für Messungen im Infrarotbereich zu entwickeln. Während die höhere Effizienz die Ausbeute der Entfernungsmessungen zum Mond verbessert sollen die Infrarotdetektorschaltungen insbesondere die **Zweifarbennmessungen** verbessern, d.h. die Differenz simultan gemessener Entfernungen (als Folge der Dispersion) muß besser als 1mm erfasst werden können, damit daraus signifikante Verbesserungen für die atmosphärische Refraktion abgeleitet werden können.

Die Laufzeitmessung ist unter diesem Aspekt ebenfalls zu verbessern. Bisher wurden Laufzeitähler mit Genauigkeiten um 50 ps verwendet. Heutige **Event-timer** sind wenige ps genau. Da in einem Laserentfernungsmesssystem jedoch gleichzeitig mehrere Eventtimer eingesetzt werden müssen, ist ein System zu entwickeln, das es erlaubt mehrere Event-timer zusammen zu schalten und die Messungen der Einzelelemente gegeneinander zu kalibrieren.

Entfernungsmessungen zu hochfliegenden Satelliten und insbesondere zum Mond sind stets eine technische Herausforderung, die teilweise an die Grenze des Durchführbaren geht. Insbesondere das örtliche Seeing der Atmosphäre führt oftmals dazu, dass die Beobachtungen nicht erfolgreich durchgeführt werden können. Wie in der optischen Astronomie schon gezeigt, ist es möglich derartige Scintillationseffekte durch **adaptive Optik** zu vermindern. Es ist daran gedacht künftig WLRS durch adaptive optische Komponenten zu ergänzen, um den Seeing-Effekt zu Zielen, wie hochfliegende Satelliten und Reflektoren auf dem Mond abzuschwächen.

Die Entwicklungsarbeiten sind am WLRS durchzuführen und zu erproben. Es ist beabsichtigt soweit es technisch möglich ist, diese Verbesserungen auch auf MTLRS und auf das TIGO-SLR Modul zu übertragen. Ziel ist es, alle drei Systeme möglichst mit gleicher Bedienungs-Software zu betreiben.

Zusammenfassend lassen sich folgende Entwicklungsarbeiten nennen:

- Automatisierung des Messablaufes durch Verbesserungsmaßnahmen der Kontrollsoftware,

- Integration der Zweifarbenmessungen in den Routinebetrieb,
- Entwicklung geeigneter Detektoren,
- Entwicklung eines Eventtimersystems,
- Integration adaptiver Optik Komponenten,
- Implementation der Entwicklung auf TIGO-SLR-Modul und MTLRS.

Derzeit ist MTLRS 1 nicht einsatzbereit, da das in Auftrag gegebene Kontrollsystem nicht funktionsfähig ausgeliefert werden konnte. Personell bedingt, konnten keine Entwicklungsarbeiten am MTLRS 1 durchgeführt werden. Nachdem nunmehr jedoch für WLRs und für das TIGO-SLR Modul ein derartiges Kontrollsystem selbst entwickelt und verwirklicht wurde, liegt es nunmehr nahe, dieses Kontrollsystem auch auf MTLRS zu übertragen, um somit das System wieder einsatzbereit zu machen. Gedacht ist, gemeinsam mit einem Gastland, das Interesse hat, MTLRS zu betreiben, diese Implementation durchzuführen. Dabei geht man davon aus, dass zwei Ingenieure des Gastlandes in Wettzell unterstützt durch SLR-Ingenieure im wesentlichen die Übertragungsarbeit leisten, MTLRS in Betrieb nehmen und im Anschluß das System im Gastland installieren und betreiben. Interesse an einer derartigen Zusammenarbeit wurde aus Indien und aus den Philippinen bekundet. Mit so einer Maßnahme ist es möglich, MTLRS 1 wieder zu nutzen und das ISGN im asiatischen Bereich zu verbessern.

Die Technologie der Satelliten-Laserentfernungsmessung für die weltweit im Rahmen des ILRS eingesetzten Beobachtungsstationen hat mit den Systemen der dritten Generation einen Stand erreicht, bei dem, abgesehen von Fortschritten in der Bestimmung des atmosphärischen Einflusses nur noch durch Erhöhung der Bandbreite von elektronischen Komponenten und Baugruppen mit einer geringfügigen Steigerung der internen Messgenauigkeit zu rechnen ist. Ergänzt man jedoch ein bestehendes SLR-System um eine Komponente, welche neben der Entfernungsmessung eine präzise Richtungsmessung ermöglicht, so ergibt sich hier die Möglichkeit zu einer deutlich verbesserten Bahnbestimmung.

**Mikrowellen-Empfangssystemen** sind eingesetzt für geodätische Nutzung:

- GPS (Global Positioning System),
- GLONASS (Globales Navigation Satelliten-System),
- PRARE (Precise Range and Rangerate Experiment) und
- DORIS (Doppler Orbitography and Radiolocation Integrated by Satellite).

Die Mikrowellen-Messverfahren sind wetterunabhängig und erlauben einen wirtschaftlichen Betrieb. Der Schwerpunkt der Beobachtungen liegt beim Betrieb permanent eingerichteter GPS-Empfänger, die kontinuierlich Beobachtungsdaten für die aktive geodätische Realisierung und Laufendhaltung von Referenzsystemen im globalen (IGS), siehe Abbildung 4.5.4, europäischen (EUREF-Permanent), siehe Abbildung 4.5.5, und nationalen (GREF) Bereich, siehe Abbildung 4.5.6 liefern. Zur Verbesserung und Stützung des globalen Netzes sind Bestrebungen im Gange, Satelliten des GLONASS mit einzubeziehen. Hierzu ist es erforderlich, entsprechend permanent arbeitende GLONASS-Empfänger einzurichten und zu betreiben. PRARE dient ausschließlich dazu, um die Bahn des ERS-2 (europ. Erderkundungssatellit) zu bestimmen. DORIS, eine eigenständige französische Entwicklung, liefert Beiträge zur Realisierung und Laufendhaltung des ITRF. Hier ist es künftig notwendig, die Station Wettzell und TIGO mit einem DORIS-Empfänger auszustatten und Messdaten bereitzustellen.

Von allen Stationen werden täglich (auch an Samstagen und Sonntagen) 24-Stundendatenfiles abgerufen, in RINEX konvertiert und dem Daten- und Auswertezentrum des BKG nach Frankfurt zugeleitet. Der Datenfluß ist weitgehend automatisch eingerichtet, jedoch ist eine durchgreifende einheitliche und zuverlässige Datenübertragung von allen Stationen nicht möglich. Täglich ist der Datenfluß zu kontrollieren und gegebenenfalls manuell nachzubessern, wenn technische Ausfälle vorliegen.

Für besondere Aufgaben, wie die Ableitung atmosphärischer Parameter, werden von ausgesuchten Stationen GPS-Beobachtungen im Stundentakt angefordert. Diese Stationen sind so eingerichtet, dass neben dem 24 h-Datenfile auch die Beobachtungsdaten im Stundentakt bereitstehen. Künftig ist beabsichtigt, von

ausgesuchten Stationen die Daten in Echtzeit zu übertragen und auszuwerten. Der reibungsfreie Datenfluß setzt voraus, dass die permanent eingerichteten Stationen technisch einwandfrei funktionieren. Die Stationen sind daher redundant und recht aufwendig konzipiert und bedürfen einer regelmäßigen Wartung (einmal pro Jahr). Es sind z. B. die Notstromanlagen regelmäßig zu warten und Ausfälle der Empfänger, der Steuerrechner und Datenübertragungseinrichtungen zu überwachen und zu beheben. Ebenso sind die Komponenten der schnellen technologischen Entwicklung anzupassen (Rechner, Modems, Betriebssysteme, etc.).

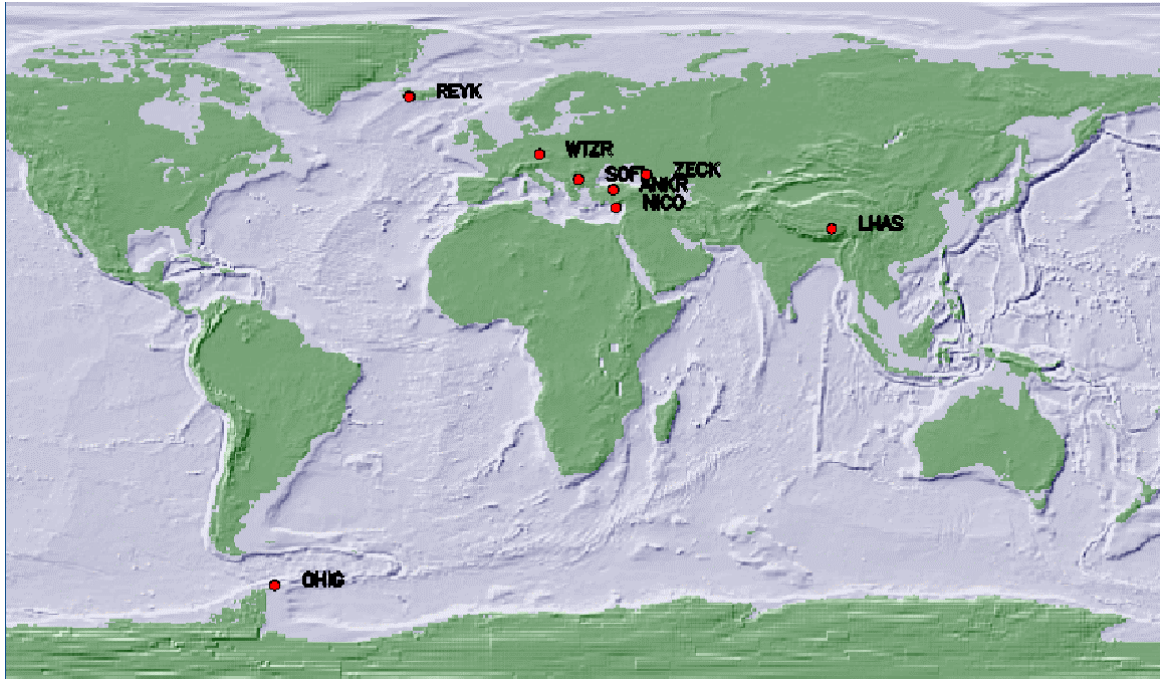


Abbildung 4.5.4: Beobachtungsstationen im IGS

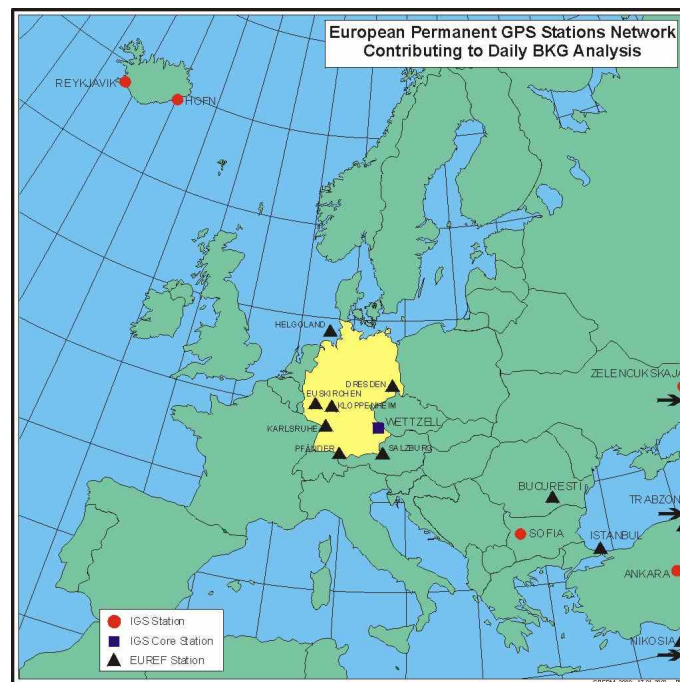


Abbildung 4.5.5: Beobachtungsstationen im EUREF Permanent-Netz





Abbildung 4.5.6: Beobachtungsstationen im GREF Permanent-Netz

Es werden **GLONASS-Empfänger** auf den folgenden Stationen betrieben:

- Wetzell (ASHTECH Z18)
- Reykjavik (ASHTECH Z18)
- Lhasa (818).

Wie die GPS-Empfänger werden die Daten in 24 Stunden-files täglich abgerufen und zur weiteren Verarbeitung in die IGS-Datenbank geleitet. Auch für diese Systeme fällt Wartungs- und Entwicklungsarbeit an.

Der Einsatz geodätischer Raumverfahren auf der Station Wetzell setzt verschiedene **Grunddienste** voraus. Hierzu zählt

- der Betrieb eines Zeit-/Frequenzsystems,
- die Erfassung meteorologischer Parameter,
- die regelmäßige Vermessung der lokalen Vermessungsnetze, zur Bestimmung der Exzentrizitäten zwischen den Raummesssystemen.

Desweiteren sind örtliche Registrierungen zur kontinuierlichen

- Erfassung der Schwere und deren Veränderungen mit Hilfe eines Supraleitenden Gravimeters,
- Aufzeichnung der Seismik bzw. von Erdbeben mit Hilfe von Seismographen

notwendig.

Zu dem Arbeitsbereich "Allgemeine Dienste" zählt auch die **IT-Betreuung**, insbesondere

- Rechnerbetreuung (Hardware, Software und Betriebssysteme),
- Betreuung der Realtime-Processing (WLRS, Radioteleskop, GPS, etc.),
- Bereitstellung der Messdaten über den internen und externen Rechnerverbund (LAN/WAN).

Hinsichtlich der Entwicklungsarbeiten sind insbesondere zu nennen:

- Überarbeitungsmaßnahmen im Zeit/Frequenzsystem durch einen neuen Zeitmessplatz, durch die Integration neuer Cs-Atomuhren als Ersatz für alte, nicht mehr zu reparierende Uhren,
- Einbezug des Zeit/Frequenzsystems in das vom IGS/BIPM vorgeschlagene Zeitübertragungsexperiment über GPS-Phasenmessungen,
- Kalibriermessungen der Wasserdampfadiometer und deren Einsatz im GREF-Netz zur Verbesserung der Refraktionskorrekturen,
- Durchführung einer örtlichen Vermessung zur Integration der TIGO-Referenzpunkte ins lokale Vermessungsnetz, sowie zur Deformationsanalyse,
- Aufbau eines automatischen "Footprint"-Messsystems durch Installation von vier GPS-Permanent-Stationen auf Punkten des Überwachungsnetzes,
- Verbesserung der Sicherheit der WAN/LAN-Server,
- Entwicklung von Serverroutinen für die Vorhaltung von Messdaten in Echtzeit über "Anonymous FTP" und "WWW",
- Aktualisierung und Laufendhaltung der WEB-Seiten für die Dienste IGS, ILRS und IVS.

### 4.5.3 Entwicklung neuer Messsensoren (Lokale Rotationssensoren / Laser-Kreisel)

Mit dem Bau eines lokalen Rotationssensors (Laserkreisel) ist im Jahr 1999 begonnen worden. Mit dem **Großring** soll eine Gesamtempfindlichkeit von  $10^{-9} \Omega_{\otimes}$  (Winkelgeschwindigkeit) der Erdrotation bei einer Zeitauflösung von 1-2 Stunden erreicht werden. Dadurch soll die hohe Genauigkeit der Erdrotationsbestimmung, wie sie heute bei einer Zeitauflösung von nicht besser als einem halben Tag durch den Einsatz geodätischer Raumverfahren (VLBI, SLR/LLR), GPS möglich ist, im geowissenschaftlich zunehmend interessierenden Kurzzeitbereich erschlossen werden. Abhängig von der erreichbaren Empfindlichkeit werden verschiedene Vorgänge aus dem Bereich der Geowissenschaften wie auch der Grundlagenphysik erschlossen, beispielsweise

- Erdrotationsschwankungen ( $> 10^{-8} \Omega_{\otimes}$ ),
- lunisolare Erdzeiten ( $> 10^{-8} \Omega_{\otimes}$ ),
- Rotationsanteile in seismisch und tektonisch bedingten Prozessen,

Als Vorentwicklung für den geplanten Hochpräzisionsringlaser wurde von der FGS, vertreten durch BKG und FESG/TUM, in Zusammenarbeit mit dem

- Department of Physics and Astronomy der University of Canterbury, Neuseeland und der
- School of Electrical and Computer Engineering der Oklahoma State University, Stillwater, USA

ein Ringlaser vom Typ des neuseeländischen CI-Ringlasers mit modernster Technologie gebaut (Ringlaserprojekt CII):

- Verwendung der Glaskeramik Zerodur für den Resonatorblock (Ausdehnungskoeffizient  $\sim 10^{-8}$ ) in Monolithbauweise,
- höchstreflektierende Umlenkspiegel (Reflexionsverlust  $\leq 1-2$  ppm),

- ultrahochvakuumdichte Bauweise,
- Analog/Digital-Wandlung und Hochfrequenzanregung des laseraktiven Mediums,
- Verwendung der grafischen Programmiersprache LabVIEW zur echtzeitnahen Signalverarbeitung und Prozeßvisualisierung,
- Amplituden- und Frequenzstabilisierung.

Die für den Nachweis bzw. die Messung der genannten Effekte, die überwiegend für die Vermarkung hochgenauer terrestrischer Bezugssysteme bedeutsam sind, notwendige Empfindlichkeitssteigerung erfordert eine Vergrößerung der wirksamen Fläche auf etwa 16 m<sup>2</sup>. Ausgehend von den experimentellen Erfahrungen mit dem CII-Ringlaser, bei dem alle kritischen Baukomponenten und Elemente, die für den Großring Verwendung finden, getestet werden, erfolgte die detaillierte technische Auslegung des für die Station Wettzell geplanten Hochpräzisionsringlasers (Abbildung 4.5.7). Es ist mit einer Bauzeit einschließlich der Infrastrukturmaßnahmen auf der Fundamentalstation Wettzell von etwa 3 Jahren zu rechnen.

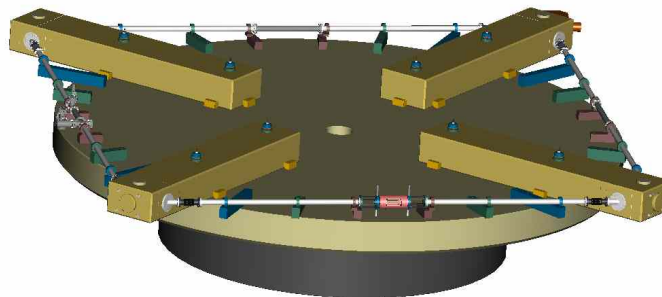


Abbildung 4.5.7: *Konzeption des Großringlasers*

Für den lokalen Rotationssensor ist eine unterirdische Aufstellung in einem **Tiefenlabor** zwingend notwendig (Abbildung 5.4.8). Nur dadurch können

- die erforderliche hohe Temperaturkonstanz sichergestellt und
- die bestmögliche Abschirmung von Rotationsanteile erzeugenden Umgebungseinflüssen erreicht werden.

Ein Teil der nötigen methodischen Untersuchungen ist Gegenstand eines im DFG-Paketantrag Rotation der Erde enthaltenen Teilantrages, der die Entwicklung eines Orientierungsmodells für lokale Rotationssensoren beinhaltet und gemeinsam von FESG/TUM, BKG, Uni Tübingen und TU Dresden bearbeitet wird.

Im Zeitraum bis 2005 sind folgende Arbeitsschritte vorgesehen:

- Einrichtung des unterirdischen Labors sowie Durchführung der erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen auf der Fundamentalstation
- Projektbegleitung, Werksabnahme, Aufstellung und Endabnahme des Großrings auf der Fundamentalstation Wettzell
- Betrieb des Ringlasers und Analyse der Ergebnisse, Vergleich mit anderen Verfahren, Orientierung des Kreisels

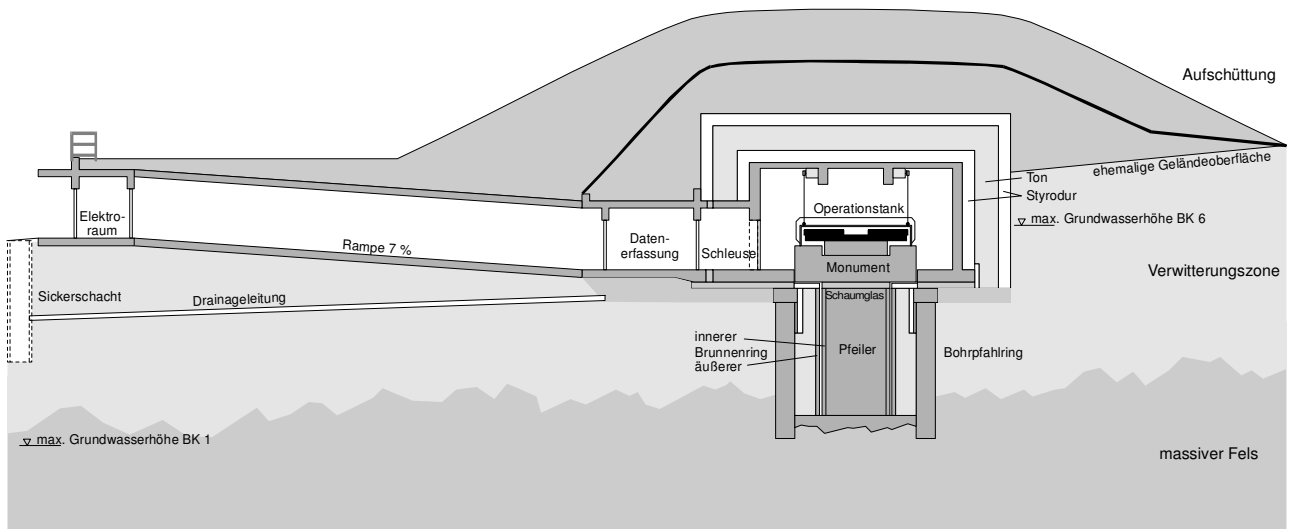


Abbildung 4.5.8: Schemazeichnung für das Tiefenlabor

#### 4.5.4 Transportables Integriertes Geodätisches Observatorium TIGO

Forschungsziele mit vorwiegend geodynamischer Zielsetzung müssen sich auf Fundamentalstationen als Basis- oder Referenzstationen einerseits und auf ein breites Spektrum mobiler Messsysteme andererseits stützen können. Die Anzahl und die geographische Verteilung der Basisstationen sind unbefriedigend, vor allem auf der Südhalbkugel. Eine Verbesserung dieser Situation ist durch die Entwicklung und den Bau des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums (TIGO) gegeben.

Das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium TIGO entspricht in seiner Funktion einer Fundamentalstation, die wie Wettzell Beobachtungsdaten für die Realisierung und Laufendhaltung von Referenzsystemen liefern soll. Derzeit ist TIGO in der Realisierungs- und Erprobungsphase und wird auf der FS-Wettzell betrieben.

TIGO beinhaltet die folgenden Module

- VLBI-Modul,
- SLR-Modul,
- Grundmodul I (Zeit/Frequenz, GPS, Gravimeter, Seismometer, Meteorolog. Sensoren),
- Grundmodul II (Notstromversorgung, Sozialraum, Werkstätte),
- Energiemodul (Stromgeneratoren).

Die hardwaremäßigen Maßnahmen sind abgeschlossen. Es sind noch

- Integrationsarbeiten,
- Testmessungen,
- Systemverbesserungen

durchzuführen.

Die **Integrationsarbeiten** umfassen

- die Erstellung von Serverprogrammen, um den einzelnen Messmodulen die notwendigen Daten und Informationen zur Verfügung zu stellen, z. B.
  - Bereithaltung der meteorologischen Parameter,
  - Bereithaltung der Zeitinformation,
  - Statusinformation der Messsysteme,
  - automatische Funktionen für den Datenfluß nach innen wie nach außen (IRV-Vektoren, VLBI-Schedules, E-mails, etc.)
- Inbetriebnahme der Messsysteme im Grundmodul
  - GPS,
  - Seismometer,
  - Gravimeter,
  - meteorologisches Datenerfassungssystem und Radiometer,
- Integration des Zeit/Frequenzsystems.

**Testmessungen** werden für alle Messsysteme unter Feldbedingungen durchgeführt. Schwerpunktmäßig sind jedoch Testmessungen notwendig, um die Datenqualität und die Betriebszuverlässigkeit zu sichern. Hier werden insbesondere nach allen getroffenen Maßnahmen weitere

- SLR-Testbeobachtungen und
- VLBI-Testbeobachtungen

in Kollokation zur FS-Wertzell erforderlich.

**Systemverbesserungen** sind am

- SLR-Modul im Bereich des Kontroll- und Zeitmesssystems vorzunehmen, um die Betriebssicherheit langfristig zu gewährleisten (Ersatz der Transputer/Ersatz eines Laserpulsgenerators) und um die Messgenauigkeit zu verbessern (Ersatz des Eventtimers),
- VLBI-Modul am S-Band-Empfänger

notwendig. Das S-Band muß in der Effizienz noch optimal abgestimmt werden, während das X-Band bereits sehr gut ist.

Im Sommer 1999 wurde eine Ausschreibung veröffentlicht, mit dem Ziel, geeignete Partner für den **Feldbetrieb** von TIGO zu finden. Es gingen Bewerbungen ein aus Brasilien, Argentinien, Chile, Indien, Indonesien und Philippinen. Nachdem die Stationen erkundet waren und die Institutionen sich schriftlich erklärten, welche Leistungen sie übernehmen könnten, konnte der Einsatzort für TIGO vorentschieden werden. Unter Bewertung der Kriterien

- größtmöglicher Beitrag zu ITRF,
- geologische Voraussetzungen,
- meteorologische Voraussetzungen,
- Unterstützung des Partnerinstitutes,
- Nutzung der Daten für gemeinsame wissenschaftliche Arbeiten,

wurde ein Konsortium mehrerer Institutionen an der Universität Concepción und ein geeigneter Standort in Concepción/Chile ausgewählt werden.

Die weiteren Schritte sind nunmehr

- Erarbeitung einer Vereinbarung,
- technische Detailprüfungen des Standorts,
- Schaffung der Infrastruktur und Bau der Plattform.

Ab dem Jahr 2001 ist der Betrieb von TIGO in Concepción vorgesehen. Dabei sollen die Daten über die internationalen Dienste, insbesondere der Verbesserung des globalen Referenzsystems zugute kommen.

#### **4.5.5 Betrieb der geodätischen Einrichtungen der Beobachtungsstation O'Higgins in der Antarktis**

Auf O'Higgins wird eine der beiden am weitesten südlich gelegenen VLBI-Stationen der Welt betrieben (die japanische Antarktisstation Syowa hat Anfang 1998 erstmals erfolgreich VLBI-Daten aufgezeichnet). O'Higgins ist für die Verbindung der weltweit verteilten VLBI-Stationen über die südliche Polkappe und für die Koordinatenbestimmung der auf der südlichen Hemisphäre gelegenen Radioquellen von besonderer Bedeutung. Das zuverlässige Betreiben dieser Station erfordert Fernüberwachung und periodische Personaleinsätze. Die Station wird gemeinsam mit der Deutschen Agentur für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) betrieben. Die gemeinsam durch die DLR und das BKG genutzten Einrichtungen und Geräte sind:

- die VLBI/SAR-Antenne,
- Gemeinschaftseinrichtungen der Station,
- Strom- und Wasserversorgung und weitere Infrastruktureinrichtungen.

Durch das BKG werden die geodätischen Messsysteme

- VLBI-Empfangs- und Aufzeichnungstechnik (etwa 10 Experimente mit je 24-stündigen Aufzeichnungen pro Jahr),
- GPS- und PRARE-Datenempfang (permanent, automatisch),
- Pegelregistrierungen (permanent, automatisch),
- absolute/relative Schwerebestimmungen (Kampagnen) und
- die Datenfernübertragungstechnik

betrieben.

Die automatisch arbeitenden Gerätesysteme bedürfen turnusmäßig einer Wartung, Kontrolle und ggf. Reparatur. VLBI-Experimente werden in Verbindung mit den Wartungseinsätzen durch die periodisch zweimal pro Jahr vor Ort tätigen Mitarbeiter durchgeführt. Die Daten der permanent arbeitenden Einheiten werden kontinuierlich zur Fundamentalstation Wettzell für die weitere - international organisierte - Nutzung übertragen.

Zur Kontrolle des Bewegungsverhaltens der VLBI-Station O'Higgins in Bezug auf die Antarktische Halbinsel ist die Einrichtung eines GPS-Überwachungsnetzes mit regionalem Charakter erforderlich. Dieses Netz soll mindestens vier Permanentstationen umfassen (1 GPS-Permanentstation arbeitet bereits auf O'Higgins). Die Standorte sind in Zusammenarbeit mit anderen Stationen im Umfeld der Antarktischen Halbinsel auszuwählen. Der Betrieb der Permanentstationen ist automatisiert auszulegen. Die Datenübertragung wird entsprechend den örtlichen Bedingungen und Möglichkeiten (E-mail oder offline) im "Post-Processing"-Modul realisiert. Die Auswertung der Kontrollmessungen wird durch das BKG erfolgen.

Für die Wartung der geodätischen Technik und für VLBI-Kampagnen sind jährlich zwei Einsätze von zwei Mitarbeitern über jeweils 1,5 - 2 Monate vorgesehen. Die Einsätze werden gemeinsam mit der DLR realisiert und koordiniert. Für die An- und Abreise nach O'Higgins werden logistische Mittel der chilenischen Armee (Flugzeuge und Schiffe) genutzt.

Erforderliche Wartungsarbeiten werden in Verbindung mit den zweimal im Jahr geplanten Einsätzen realisiert. Es ist beabsichtigt, auch das VLBI-Teleskop in O'Higgins auf das MK-IV-Datenerfassungssystem umzurüsten.

## 4.6 Pilotprojekte

### 4.6.1 Heliumkreisel

Die Erzeugung quantisierter Wirbel in suprafluidem Helium bildet die Grundlage, auf der eine neue Art von Gyroskopen basiert. Der erfolgreiche Nachweis der Bildung quantisierter Wirbel in einem Helmholtzresonator hoher Güte wurde im Jahr 1999, nach einer aufwendigen Reduzierung des mechanischen und akustischen Störuntergrundes im neu aufgebauten Tieftemperaturlabor, erbracht. Die Optimierung der Komponenten des Nachweissystems wurde in den letzten Monaten vorangetrieben ebenso wie Maßnahmen zur weiteren Verringerung des Störuntergrundes. Ein selbst entwickeltes, aktives Schwingungsdämpfungssystem befindet sich zur Zeit in der Erprobung.

Der Umbau des Helmholtzresonators zu einem rotationssensitiven Detektor mit  $^4\text{He}$  als Arbeitsmedium und einer Empfindlichkeit von ca.  $10^{-2} \Omega_{\text{Erde}}$  soll in diesem Jahr stattfinden. Damit kann die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des Sensors gezeigt werden. Der nächste Schritt auf dem Weg zu einem hochgenauen Rotationssensor mit einer Empfindlichkeit von  $10^{-9} \Omega_{\text{Erde}}$  ist ihn, nach entsprechenden Modifikationen, mit suprafluidem  $^3\text{He}$  zu betreiben. Die Messung der Rotationsrate erfolgt dann direkt durch den Nachweis der Sagnac-Phasendifferenz verursacht durch den Josephson-Effekt in suprafluidem  $^3\text{He}$ . Als Messgröße wird die Phasendifferenz zwischen der Anregung des Helmholtzresonators und seinem Antwortsignal detektiert.

### 4.6.2 Orientierung von Kreiseln (optische Interferometrie)

Derzeit wird auf der Fundamentalstation Wettzell der Großringlaser G errichtet, der Variationen der Erdrotation in der Größenordnung  $10^{-9}$  der Erdrotationsrate auflösen wird. Entscheidend ist dabei die Kenntnis, wie die Flächennormale des Ringlasers bezüglich der Erdrotationsachse orientiert ist, bzw. deren zeitliche Veränderungen zueinander.

Die Abbildung 4.6.1 faßt die Störeinflüsse auf das Sagnac-Signal zusammen sowie deren Wechselwirkung und Einfluss auf die Orientierung des Ringlasers.

Eine Winkeländerung der Ringlaserebene bezüglich der Erdrotationsachse verändert die wirksame Ringlaserfläche und somit die Sagnac-Frequenz. In mittleren Breiten und bei horizontaler Aufstellung des Ringlasers (d. h. Ringlaserebene senkrecht zum Lot) bedeutet eine Neigung von 1 nrad in NS-Richtung eine relative Änderung der Sagnac-Frequenz von  $10^{-9}$  (Riepl 1998). In dieser Größenordnung spielen Orientierungsänderungen durch lokale Verformungen im Untergrund eine wichtige Rolle. Da die Übertragungsfunktionen der verursachenden Größen (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Grundwasserstand, Luftdruck) weitgehend unbekannt sind, werden hochauflösende Neigungsmesser auf dem Ringlaserblock installiert, um dessen Orientierungsänderung gegen die Lotrichtung zu erfassen. Die Neigungsdaten müssen noch um die zeitliche Änderung der Lotrichtung bezüglich der Rotationsachse korrigiert werden, bevor diese für die Korrektur des Sagnac-Signals verwendet werden können.

Die folgenden Maßnahmen sind erforderlich, um die Orientierung der Ringlaserebene zu überwachen:

- Aufbau eines Systems von Sensoren zur Überwachung der Orientierung der Ringlaserebene sowie der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Grundwasserstand).
- Entwicklung eines Verfahrens zur Elimination von Störsignalen aus den Datenreihen des Ringlasers.

Darüber hinaus wird eine Projektstudie vorgeschlagen, die der Möglichkeit nachgeht, die Orientierungsebene des Ringlasers mit Hilfe eines optischen Interferometers zu erfassen.



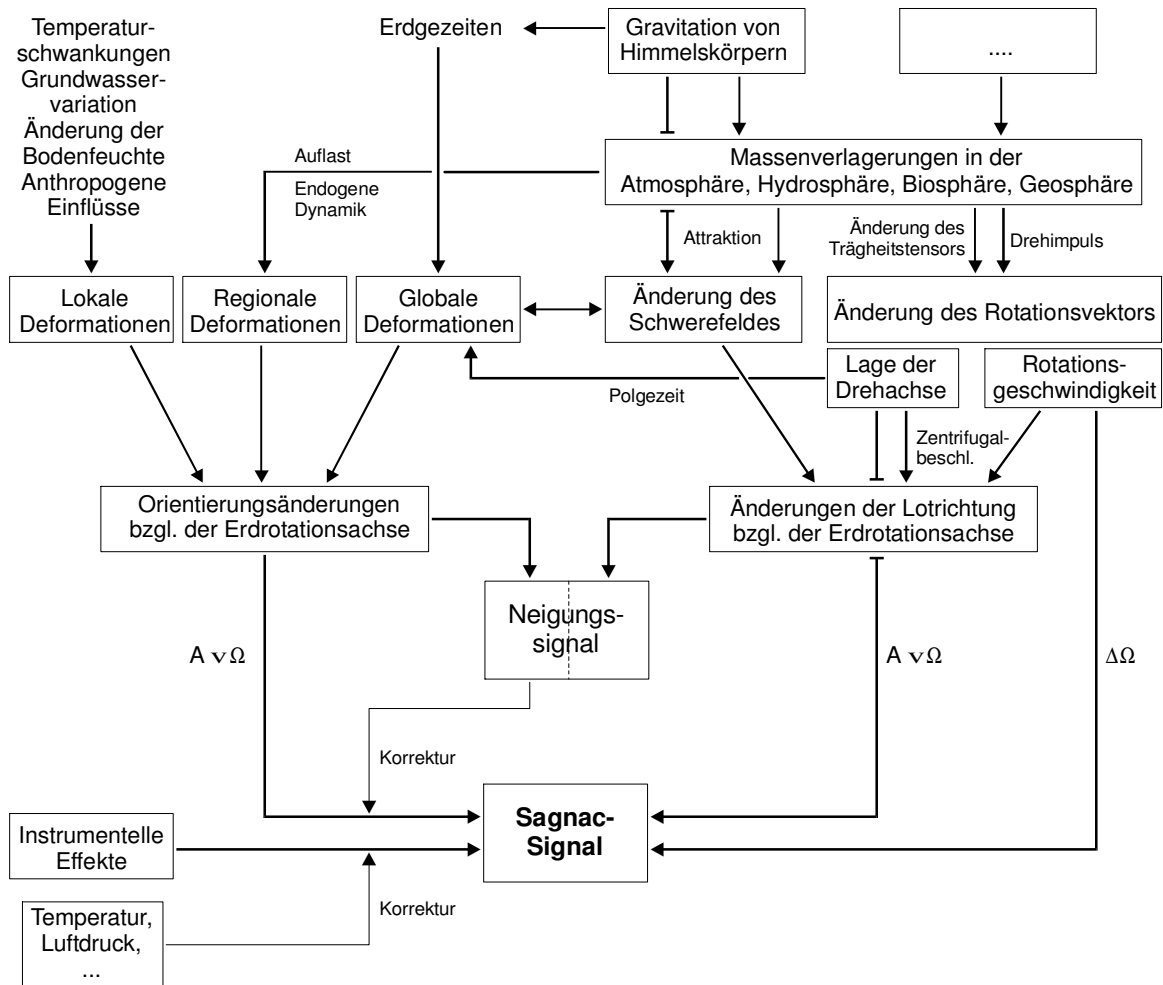


Abbildung 4.6.1: Störgrößen (linke Seite) und Zielgrößen (rechte Seite) im Sagnac-Signal eines Ringlasers zur Erfassung von Erdrotationsschwankungen, sowie deren Wechselwirkungen und Einfluß auf die zur Korrektur der Orientierungsänderungen erforderlichen Neigungsmessungen.

Die optische Interferometrie zu Sternen des Hipparcos/Tycho-Kataloges eröffnet diese Möglichkeit. Die hier angestrebte Projektstudie soll ausgehend von den existierenden Funktionsgruppen "Optisches Interferometer" und "Ringlaser" die notwendige Verbindungsmetrologie untersuchen und spezifizieren.

### 4.6.3 Das SELENE-Projekt

Die japanische Weltraumbehörde hatte Vorschläge für ihre Mondmission Selene erbeten. Selene wird in den nächsten zwei Jahren gestartet und wird u. a. eine Radioquelle, die von VLBI-Radioteleskopen angemessen werden kann, auf die Mondoberfläche setzen. Mit Selene II folgt einige Jahre später eine zweite Mission, bei der ein Reflektor für die Laserentfernungsmessung in Kollokation mit einer Radioquelle auf die Mondoberfläche gebracht werden soll, was die Kombination von Richtungs- und Entfernungsmessungen erlaubt. Seitens der FGS wurde vorgeschlagen, einen aktiven Lasertransponder auszusetzen. Dieses

erleichtert die LLR-Beobachtungen und wird eine Zunahme von LLR-Messungen nach sich ziehen, da dadurch den meisten Stationen der Mond als erreichbares Ziel erschlossen wird.

Der Konzeptvorschlag befindet sich zur Zeit in dem Auswahlverfahren für die Selene II-Mission.

#### 4.6.4 Projektstudie VLBI

VLBI ist die einzige Technologie, die das ICRF realisiert und laufend hält. Weiterhin wird VLBI eine wesentliche Rolle bei der Erfassung der Drehbewegung der Erde spielen. Hierzu werden künftig weiterhin leistungsfähige "VLBI-Network Stations" von Nöten sein. Das Radioteleskop Wettzell wurde Ende der 70er, Anfang der 80er Jahre konzipiert und gebaut. Etwa 20 Jahre später ergeben sich neue Anforderungen an ein Radioteleskop mitsamt der Datenregistrierung (VLBI-Messanlage):

- Systemverbesserungen zur Echtzeitanbindung,
- Automatisierung des Messablaufs,
- Integration der verschiedenen Aufzeichnungssysteme und des Standardinterface,
- Parallelbeobachtung von Quasaren und Navigationssatelliten

sind künftig unumgänglich. Es wird geplant, im Rahmen einer Projektstudie die Erfordernisse herauszuarbeiten und mögliche Lösungsansätze vorzuschlagen. Ergebnisse dieser Projektstudie sind Lösungsvorschläge und Spezifikationen, die effektiv die Systemverbesserungen einbringen und als Grundlage für wirtschaftliche Entscheidungen in den Folgejahren dienen werden.

#### 4.6.5 Objektorientierte Methodenbank (Astro-Toolbox)

Vorhandene Softwarelösungen zur Analyse von Messdaten, zur Steuerung von Messprozessen und zur Vorhersage von Bahndaten oder Ephemeriden sind durchweg abgeschlossene Programmsysteme. Sie sind meist nicht ohne grossen Aufwand zerlegbar, was zur Folge hat, dass Lösungen zu Teilproblemen, die bereits realisiert worden sind, unzugänglich bleiben. Ähnlich gelagerte Problemstellungen werden daher fast immer durch eine Neuprogrammierung gelöst.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma bietet die konsequente modulare Programmierung, die objektorientierte Programmierung. Langfristig wird sich der erhöhte Aufwand, der von der Objektmodellierung abverlangt wird, durch erleichterte Pflege, Weiterentwicklung und erhöhte Programmsicherheit auszahlen.

Im Rahmen der objektorientierten Programmierung wurden Verfahren der Geodäsie, der Astronomie und der Himmelsmechanik in Form von Objekten definiert. Unter einer graphischen Benutzeroberfläche können die entstandenen Objekte zu komplexeren Problemlösungen zusammengeschaltet werden. Die entstandene Astro-Toolbox macht sich die Möglichkeiten des Internet zunutze und kann sowohl von gängigen www-Browsern aus aktiviert werden als auch als Application, in Form eines eigenständigen Programms, lokal auf einem Rechner laufen.

Abbildung 4.6.2 zeigt einen Schaltplan, der eine Reihe von Tools, repräsentiert durch ihre Buttons, und eine Reihe von Verknüpfungen (jeweils von rot nach blau bzw. von der rechten Seite eines Toolbuttons zur linken Seite eines anderen) enthält. Die hier gewählte Anordnung erlaubt die Berechnung und die graphische Darstellung der Position der Sonne für einen beliebigen Beobachtungsort auf der Erde. Das AutoIncrement-Tool (mitte links) dient zur Animation des Sonnenlaufs.

Die Astro-Toolbox wurde komplett unter JAVA realisiert und befindet sich in einer einsatzfähigen Anfangsphase. Sie beinhaltet bereits eine Reihe von elementaren Objekten wie *Vektoren* und *Matrizen* oder

Referenzsysteme, Zeitskalen und Transformationen. Soweit als möglich liegt den Objekten eine hierarchische Struktur zugrunde, die über das Konzept der Vererbung programmtechnisch leicht greifbar wird.

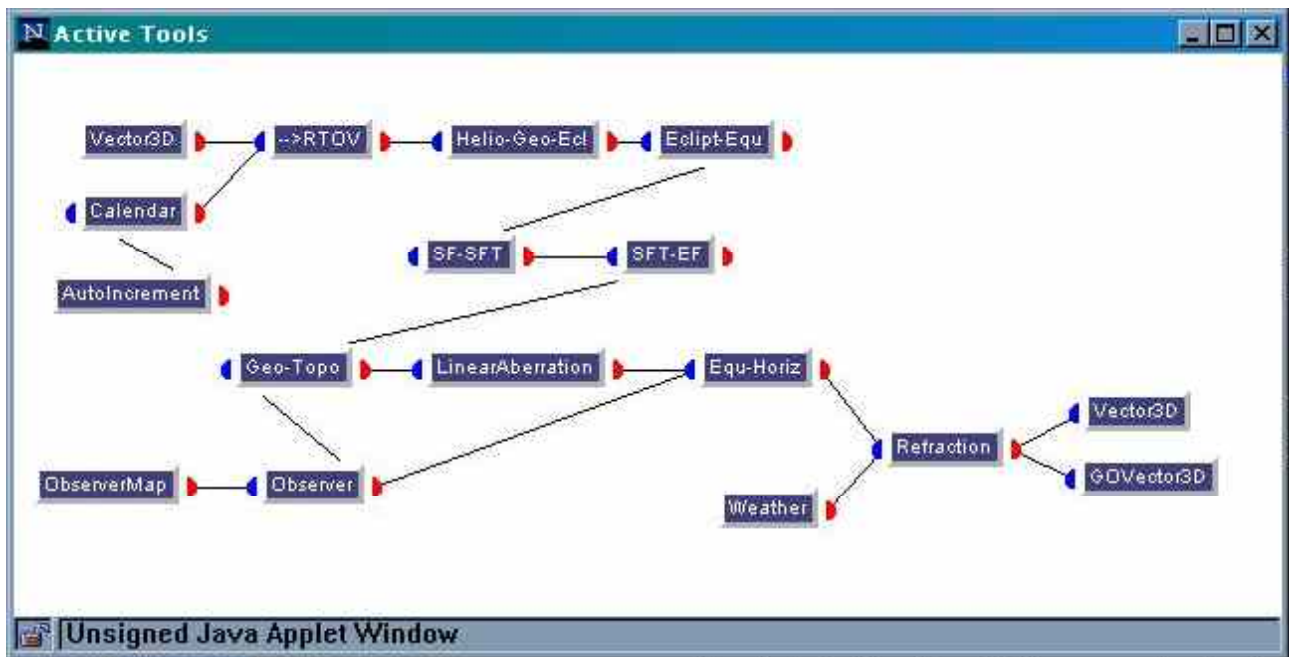


Abbildung 4.6.2: Schaltplan mit Tools und Verknüpfungen.

Ein wichtiges Ziel wird die weiterführende objektorientierte Modellierung der in Frage kommenden Bereiche aus Astronomie, Geodäsie und Himmelsmechanik sein. Sind die Objekte erst einmal gefunden und modelliert, können sie leicht implementiert werden. Sie bilden dann neue Tools der Toolbox und können dadurch bequem genutzt und mit den bereits vorhandenen Tools verknüpft werden.

Zusätzlich soll in einem weiteren Schritt die Möglichkeit der verteilten Speicherung und Ausführung untersucht werden. Dadurch sollen Tools nutzbar gemacht werden, die sich auf anderen Rechnern befinden und auch von anderen Wissenschaftlern erstellt und gewartet werden. Ob die Tools kopiert und auf dem eigenen Rechner ausgeführt werden oder ob sie auf dem fremden Rechner ablaufen sollen, könnte im Einzelfall, je nach Auslastung der jeweiligen Rechner, geklärt werden.

#### 4.6.6 Projektstudie IT Beobachtungs- und Analysedaten im Bereich der Raumverfahren

Bei allen geodätischen Raumverfahren fallen sehr große Datenmengen an. Außerdem werden zusätzlich Daten unterstützender Messverfahren benötigt. Sie werden über Datenbanken den Analysezentren bereitgestellt und schließlich Ergebnisdaten (Produkte) erzeugt und veröffentlicht. In den letzten Jahren wurden die Datenhaltung und der Datenversand für die einzelnen Raumverfahren sehr individuell und unterschiedlich gestaltet. Oftmals wurden einfache Filesysteme zur Datenarchivierung aufgebaut. Beim Austausch und der Zusammenführung der Daten traten jedoch größere Schwierigkeiten auf, weil sie in unterschiedlichen Strukturen vorliegen, verschiedene Auswertemethoden angewendet werden und Metadaten gar nicht oder unzureichend erfasst wurden. Diese Umstände ziehen einen erheblichen organisatorischen Aufwand nach sich und binden in unnötigem Umfang Personal.

Heute gibt es leistungsfähige Datenbanksysteme, die Archivierung und Bereitstellung der Messdaten vereinfachen und sicherer gestalten. Für Erfassung und Führung von Metadaten sind Standards entwickelt worden, die den Datenaustausch erleichtern und eine korrekte Nutzung der Daten gewährleisten.

In einer Projektstudie sollen die Datenmengen, die Datenströme, Archivierungs- und Bereitstellungsmethoden mit dem Ziel analysiert werden, Metadaten in erforderlichem Umfang zu erfassen und zu verwalten und eine effektive und wirtschaftliche Datenhaltung für alle Messverfahren von der Datengewinnung über die Auswertung bis zur Produkterstellung zu entwickeln und einzusetzen.



## 5. 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 (siehe Übersicht auf der nächsten Seite)

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

orientierte schwerpunktmäßige Zuordnung der Verantwortungsbereiche für die Durchführung der Forschungsvorhaben vorgesehen werden. Zusätzlich beteiligt sich der Lehr- und Forschungsbereich Theoretische Astrophysik, Universität Tübingen an den Arbeiten der FGS.

Mit einem Erlass verfügte das Bundesministerium des Innern am 4. August 1997 über umfassende Veränderungen zur Organisation und Aufgabenstruktur des ehemaligen Instituts für Angewandte Geodäsie. Neben der Namensänderung in das „Bundesamt für Kartographie und Geodäsie“ ergaben sich Veränderungen im Aufgabenspektrum. Die Aufgaben wurden auf einen im Bundesinteresse liegenden Kernbereich - außerhalb der Forschung - zurückgeführt. Sie liegen u. a. in der Bereitstellung und Laufendhaltung geodätischer Referenzsysteme unter Einschluss der erforderlichen vermessungstechnischen Leistungen zur Gewinnung der Messdaten, der Mitwirkung an bilateralen und multilateralen Arbeiten und der Fortentwicklung der Mess- und Beobachtungstechnologien, sowie die Vertretung der Bundesrepublik auf internationaler Ebene. Es wurde gleichzeitig die Einbindung als Abteilung II (Angewandte Geodäsie) in das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut (DGFI) der Deutschen Geodätischen Kommission beendet. Die ehemalige Abteilung I (Theoretische Geodäsie) des DGFI bildet heute alleine das DGFI.

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

Forschungsschwerpunkt		Im Verantwortungsbereich von					
Thematik	Ziffer	IAPG	FESG	DGFI	BKG	GIUB	Tüb.
Punktbestimmung	4.1		X	X	X	X	
Erdrotation	4.2	(X)	X	X	X	X	
Gravitationsfeld	4.3	X	(X)	(X)	X		
Kombination/Integration	4.4	(X)	X	X	X	X	
Fundamentalstation	4.5		X		X		
Pilotprojekte	4.6						
Heliumkreisel							X
Orientierung Kreisel			X		X		
SELENE			X				
VLBI					X	X	
Methodenbank			X				
Beobachtungsdaten				X	X		



## 6. Beteiligung der FGS an internationalen Diensten

Für die geodätischen Raumverfahren haben sich in den letzten Jahren internationale Dienste etabliert, die koordinierende Funktionen übernommen haben. Im Jahre 1992 wurde als erster, Messverfahren bezogener Dienst der "International GPS Service" (IGS) ins Leben gerufen, im September 1998 der "International Laser Ranging Service" (ILRS) und im Jahre 1999 der "International VLBS Service for Geodesy and Astrometry" (IVS).

Generelle Ziele der Dienste sind es

- das Netz der Beobachtungsstationen zu koordinieren, durch Standards eine hohe Datenqualität zu erzielen,
- den Datenfluß zu optimieren, um Beobachtungsdaten schnellstmöglich für Analyseaufgaben in Datenbanken verfügbar zu haben, mitsamt gesicherter Archivierung durch "gespiegelte" Datenbanken,
- die Datenanalyse zu koordinieren, durch Analysezentren, die regelmäßig vergleichbare Produktserien erzeugen,
- die Ergebnisse zu kontrollieren und für Nutzer bereitzustellen und zu veröffentlichen,
- die technologische Entwicklung voranzutreiben.

Im Rahmen der IAG werden die Raumverfahren innerhalb der CSTG (International Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics) koordiniert, ausschließlich mit wissenschaftlicher Zielsetzung. Für die Erzeugung von Produkten sind die internationalen Dienste zuständig.

Durch die wachsende Notwendigkeit, die Ergebnisse der Raumverfahren, z. B.

- das erdfeste Referenzsystem,
- das raumfeste Referenzsystem, und die
- Erdrotationparameter

für viele Anwendungen verfügbar zu haben, war es zwingend erforderlich, international den Rahmen zu schaffen, an dem teilnehmende Institutionen sich verpflichteten, ihre Dienste einzubringen. Für die kontinuierliche Erzeugung der Produkte sind nunmehr die Dienste selbst zuständig.

Jeder Dienst hat als Grundlage der Zusammenarbeit vorgegebene Regeln (Terms of Reference). Es wurden Funktionen öffentlich ausgeschrieben, auf die sich die Institutionen bewerben konnten. Die Bewerbungen wurden von Fachgremien begutachtet und angenommen. Die Institutionen verpflichten sich, ihren Beitrag regelmäßig und zuverlässig zu leisten. Erst dadurch ist ein Dienst befähigt, die Produkte mit hoher, gleichmäßiger Qualität und Zuverlässigkeit zu liefern bzw. sogar zu garantieren.

Die Dienste haben untereinander eine vergleichbare Struktur. Zusammenfassend sind sie in der Tabelle 5.1.1 zusammengestellt.

Während die drei Dienste IGS, ILRS und IVS jeweils ein Raumverfahren repräsentieren und Verfahren bezogene Produkte liefern, gibt es einen weiteren Dienst, den "International Earth Rotation Service (IERS)", der die Ergebnisse aller drei Raumverfahren nutzt und aus allen verfügbaren Ergebnissen die endgültigen Produkte, wie

- das International Terrestrische Referenzsystem (ITRF),
- das Internationale Raumfeste Referenzsystem (ICRF) und
- die Erdrotationsparameter (ERP)

erzeugt und veröffentlicht. Der IERS hatte sich bereits Mitte der 80er Jahre aus dem MERIT (Monitoring the Earth Rotation and Intercompare the Technique) etabliert. Derzeit läuft eine neue Ausschreibung zur



Teilnahme bzw. Institutionen können ihren Beitrag vorschlagen. Die Auswertung des "Call for Participation" steht derzeit noch aus.

Die FGS beteiligt sich durch

- Lieferung von Beobachtungsdaten,
- Vorhaltung von Datenbanken,
- Durchführung von Analysen

an allen drei Raumverfahren bezogenen Diensten. Die Bereiche sind summarisch der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

Im Rahmen der Neuausschreibung des IERS hat sich die Forschungsgruppe beworben um

- das Zentralbüro des IERS (BKG),
- Produktzentrum ITRS (DGFI) und
- Combination Research Center (DGFI, FESG, GIUB).

Die Übernahme der Aufgaben des Analysekoordinators durch die FGS wurde für einen späteren Zeitpunkt in Aussicht gestellt.

Tabelle 6.1: *Übersicht über die Dienste IGS, ILRS, IVS, IERS*

	<b>IGS</b>	<b>ILRS</b>	<b>IVS</b>	<b>IERS</b>
Seit	<b>1992</b>	<b>9/1998</b>	<b>2/1999</b>	<b>1987</b>
im Rahmen	<b>IAG, FAGS</b>	<b>IAG</b>	<b>IAG</b>	<b>IAG, IAU, FAGS</b>
Produkte:	hochgenaue GPS-Bahnen Erdrotationsparameter Polbewegung  Stationskoordinaten Bewegungsvektoren der Stationen Zeitinformation des Satelliten, der Beobachtungsstationen Ionosphären Information Troposphären Information	hochgenaue Satellitenbahnen Erdrotationsparameter Polbewegung  Stationskoordinaten Bewegungsvektoren der Stationen  Troposphären Information Schwerefeld Information Geozentrum Mondephemeriden + Libration	Definition des ICRS und Realisierung des ICRF Erdrotationsparameter (UT1, LOD) Nutation/Präzession (Celestial Pol) Polbewegung  Stationskoordinaten Bewegungsvektoren der Stationen  Zeitinformation des Satelliten, der Beobachtungsstationen  Ionosphären Information  Troposphären Information	Kombination und Herausgabe ICRF und ITRF Kombination der Erdrotationsparameter (monatlich) daily rapid  Stationskoordinaten Bewegungsvektoren  Zeitdifferenz (UT1-UTC), Schaltsekunde  Produkte bezogen auf globale, geophysikal. Fluide (Drehmomentsänderungen)

Komponenten :	230 Network Stations 3 globale Datenzentren 6 regionale Datenzentren 7 globale Analysezentren 2 regionale Analysezentren	40 Tracking Stations 2 Global Datenzentren 3 globale Analysezentren 18 Associate AC 4 Lunar AC	30 Network Stations 3 Operations Zentren 7 Korrelator Zentren 6 Datenzentren 19 Analyse Center 9 Technology Center	Produktzentren - Erdrotation - Rapid Service (EOP) - Konventionen - ICRS - ITRS - Kombinationen - Globale geophys. Fluide
	Central Bureau Governing Board Analysis Coordinator	Central Bureau Governing Board Analysis Coordinator	Coordinating Center Directing Board Analysis Coordinator Network Coordinator Technology Coordinator	Central Bureau Directing Board Analysis Coordinator

Tabelle 6.1 (Fortsetzung): Übersicht über die Dienste IGS, ILRS, IVS, IERS

Mit all den Beteiligungen liefert die FGS einen angemessenen Beitrag im Rahmen der Internationalen Zusammenarbeit und gewährleistet verantwortlich mit die hohe und zuverlässige Qualität der Ergebnisse, die der nationalen Nutzung zugute kommt.

Tabelle 6.2: Beteiligung der FGS an den Internationalen Diensten

	BKG	DGFI	GIUB	FESG
<b>IGS</b>				
Beobachtungen	X	X	X	
Datenbank	X			
Analyse (Associated AC)	X	X		
<b>ILRS</b>				
Beobachtungen	X			
Datenbank		X		
Analyse	X	X		
LLR-Analyse				X
<b>IVS</b>				
Beobachtungen	X		X	X
Korrelation	X		X	
Datenbank	X			
Analyse	X	X	X	

Keine Industrienation kann heute auf die Einbindung seiner nationalen Referenznetze in überregionale und globale Bezugssysteme verzichten.

Für den Positionierdienst der deutschen Landesvermessungsverwaltungen SAPOS ist die Verfügbarkeit des ITRF und seine Einbindung eine ideale Voraussetzung. SAPOS basiert auf etwa 200 permanent eingerichteten GPS-Stationen, deren Koordinaten- und Bewegungsvektoren als ein einheitliches Bezugssystem bekannt sein müssen, um Aufgaben in

- der Landesvermessung,
- der Kataster- und Flurbereinigungsvermessung,

- der Navigation,
- der Geoinformation

schnell, genau und wirtschaftliche zu lösen. Einen gewöhnlichen SAPOS-Anwender braucht es nicht bewusst zu sein, dass durch die internationalen Dienste erst diese Voraussetzungen geschaffen werden. Dem BKG ist die Voraussetzung geschaffen, die von den Bundesländern vorgehaltenen Referenznetze für das Gebiet bundesweit zu vereinheitlichen und für die Aufgaben des Bundes länderübergreifend zu nutzen.

## 7. 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 insoweit erforderlichen Haushaltsmittel bereitzustellen. Dies gilt insbesondere auch hinsichtlich der Beteiligung an den Kosten des Betriebs und der Entwicklung der Fundamentalstation Wettzell.

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 eine Grundlast, die eine entscheidende Voraussetzung für die Lösung der Aufgaben der FGS bildet. Darüber hinaus leistet das BKG Beiträge zu Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die die Anlage und Laufendhaltung der europäischen Bezugssysteme in Lage, Höhe und Schwere für die Referenzierung von Geoinformationssystemen sichert.

Um das vorgeschlagene Forschungsprogramm in seinen Nahzielen voll verwirklichen zu können, ist zusätzlich zu den bestehenden Haushalten (einschließlich bewilligter Drittmittel!) der beteiligten Institutionen eine Ergänzungsausstattung erforderlich.

Diese Ergänzungsausstattung soll durch

- Einwerben von Drittmitteln und/oder
- geeignete, ggf. befristete Anhebung der Ansätze in den Haushalten der Institutionen

bereitgestellt werden.

Die Forschungsgruppe bemüht sich über Anträge bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), bei der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) und im 5. Rahmenprogramm der Europäischen Union um die Einwerbung von Drittmitteln. Eine neue Möglichkeit eröffnet sich durch das Geotechnologieprogramm, einer gemeinsamen Initiative der DFG und des Bundesministeriums für Bildung und Technologie. Das Thema „Beobachtung des Systems Erde aus dem Weltraum“ dieses Programms wurde im April 2000 ausgeschrieben; als Förderbeginn ist das Frühjahr 2001 vorgesehen. Die Ziele des Forschungs- und Entwicklungsplans der FGS fügen sich sehr gut in dieses Thema. Die FGS wird daher versuchen, sich mit mehreren Anträgen an diesem neuen Förderprogramm zu beteiligen.

### Laufende Drittmittelvorhaben

Die nachstehende Liste gibt eine Übersicht über laufende Drittmittelprojekte.

<b>Liste der Drittmittelanträge</b>			
<b>Antragsteller</b>	<b>bei</b>	<b>Kennzeichen</b>	<b>Titel</b>
IAPG	DFG	MU 1141/2-1	Integrierte Sensoranalyse am Beispiel des Satelliten CHAMP
IAPG	DFG	RU 586/3-1	Sphärisch-Harmonische Analyse des Gravitationsfeldes der Erde aus CHAMP-Daten mit einem semi-analytischen Ansatz
IAPG	ESA	13392/98/NL/GD	From Eötvös to mGal (mit anderen europäischen Partnern)

IAPG	ESTEC	12735/98/NL/GD	GOCE End to End Performance Analysis (mit anderen europäischen Partnern)
IAPG	ALENIA	APRO/SL/99/086	GOCE Scientific Advice (mit anderen europäischen Partnern)
FESG	DFG	Schn 240/6-3	Analyse der Zeitreihen lokaler Rotationssensoren
DGFI	DFG	DR 143/6-3	Berücksichtigung deformationsbedingter Sekundäreffekte bei der Modellierung der Erdrotation
DGFI	DFG	DR 143/7-1	Modellierung der Krustendeformation und der Geodynamik in der afrikanisch-arabisch-europäischen Tripelzone entlang der Jordan-Rift-Störung
DGFI	DFG	Schu 1103/2-3	Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz bei der VLBI-Auswertung
DGFI	DFG	DR 143/9-1	Entwicklung des VLBI-Programms OCCAM zur Bestimmung der Erdrotationsparameter in hoher zeitlicher Auflösung
DGFI	BMBF	03F0193A	EVAMARIA: Erkennung und Verfolgung anomaler Meerwasserstände im Nordatlantik
GIUB	DFG	Ca 92/7-1,3	Nutzung von Phasennmessungen in der geodätischen VLBI, DFG-Normalverfahren
GIUB	DFG	Ca 92/8-1	Entwicklung von Kalibrierverfahren von GPS-Antennen, DFG-Normalverfahren
GIUB	DFG	SFB 350	Erfassung und Interpretation lokaler Krustendynamik im Zusammenhang mit Fluidbewegungen und rezenter Tektonik, Teilprojekt C1 – Wechselwirkungen kontinentaler Stoffsysteme und ihre Modellierung
GIUB	EU	FMRX CT96-0071	Measurement of Vertical Crustal Motion in Europe by VLBI, EU-TMR-Netzwerk (GIUB Koordinator) mit 8 Teilnehmern in 6 Ländern der EU
BKG	EU	FMRX CT96-0071	Measurement of Vertical Crustal Motion in Europe by VLBI

## 8. Abkürzungen

AAM	Atmospheric Angular Momentum
ATKIS	Amtliches Topographisches Karten-Informationssystem
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CASA	Central And South America Geodynamics/GPS Project
CHAMP	CHALLENGING Microsatellite Payload for geophysical research and application
CIGNET	Cooperative International GPS Net
CORE	Continuous Observation of the Rotation of the Earth
CRL	Communications Research Laboratory
CSTG	International Coordination of Space Techniques for Geodesy and geodynamics
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
DLR	Deutsche Agentur für Luft- und Raumfahrt
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
DREF	Deutsches Referenznetz
EDC	Eurolas Data Center
EGG97	European Gravimetric Geoid 1997
EGM96	Earth Gravity Model 1996
ENVISAT	Environmental Satellite
EOP	Earth Orientation Parameter
ERP	Earth Rotation Parameter
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
EUREF	European Reference Frame
EUVN	European Vertical Network
FAGS	Federation of Astronomical and Geophysical Services
FAME	Full-sky Astrometric Mapping Explorer
FESG	Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie
FGS	Forschungsgruppe Satellitengeodäsie
GAIA	Global space astrometry mission der ESA
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GIS	GEO-Informationssysteme
GIUB	Geodätisches Institut der Universität Bonn
GLOBAL	Globales VLBI Experiment
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOCE	Gravity and steady-state Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery And Climate Experiment
GRAF	German Reference System
GSDI	Global Spatial Data Infrastructure
IAG	International Association of Geodesy
IAPG	Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
IAU	International Astronomical Union
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
ICSU	International Council for Science
IDS	International DORIS Service
IERS	International Earth Rotation Service
IGeS	International Geoid Service
IGEX	International GLONASS Experiment

IGGOS	Intergrated Global Geodetic Observing System
IGS	International GPS Service
IGSN	International Geodetic Space Network
ILP	International Lithosphere Project
ILRS	International Laser Ranging Service
ION	Institute of Navigation
IRIS	International Radio-Interferometric Surveying
IT	Informationstechnologie
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	International VLBI Service
JASON	Altimetersatellit (Nachfolge von TOPEX/POSEIDON)
LEO	Low Earth Orbiter
LLR	Lunar Laser Ranging
MERIT	Monitoring the Earth Rotation and Intercompare the Techniques
MPIfR	Max-Planck-Institut für Radioastronomie
MTLRS	Modulares Transportables Laserentfernungsmesssystem
NEOS	National Earth Observation Service
NSDI	National Spatial Data Infrastructure
OAM	Ocean Angular Momentum
PRARE	Precise Range and Range Rate Equipment
RINEX	Receiver INdependent EXchange format
SAPOS	Satelliten-Positionier-System der AdV
SAR	Synthetic Arperture Radar
SELENE	SELenological and ENgineering Explorer
SFB78	Sonderforschungsbereich 78
SINEX	Solution (software/technique) INdependent EXchange format
SIRGAS	SIstema de Referencia Geocentrico para America del Sur
SLR	Satellite Laser Ranging
SNAP	Sphärische Neue lineare analytische APproximation
SST	Satellite-to-Satellite Tracking
TIGO	Transportables Integriertes Geodätisches Observatorium
TUM	Technische Universität München
UELN	United European Leveling Network
UT1	Universal Time 1
UTC	Universal Time (Conventional)
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WEGENER	Working Group of European Geoscientists for the Establishment of Networks for Earth Science Research
WLRS	Wetzell Laser Ranging System