



**Centre of Geodetic Earth System Research**

**Research and Development Programme  
2011–2015**

***Forschungs- und Entwicklungsprogramm  
2011–2015***

**CGE Report 1  
2012**

## **Imprint**

Centre of Geodetic Earth System Research (CGE), a collaboration between

Institute of Astronomical and Physical Geodesy (IAPG)

Technische Universität München

Arcisstraße 21, D-80333 München

Research Facility Satellite Geodesy (FESG)

Technische Universität München

Arcisstraße 21, D-80333 München

Commission for Geodesy and Glaciology (KEG), Geodesy Section

Bavarian Academy of Sciences and Humanities

Alfons-Goppel-Str. 11, D-80539 München

German Geodetic Research Institute (DGFI)

Alfons-Goppel-Str. 11, D-80539 München

This work is published as Number 1 in the *CGE Reports* series. An electronic version is available from <http://www.cge-munich.de>.

## **Impressum**

Centrum für Geodätische Erdsystemforschung (CGE), eine Kooperation zwischen

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG)

Technische Universität München

Arcisstraße 21, D-80333 München

Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG)

Technische Universität München

Arcisstraße 21, D-80333 München

Kommission für Erdmessung und Glaziologie (KEG), Abteilung Erdmessung

Bayerische Akademie der Wissenschaften

Alfons-Goppel-Str. 11, D-80539 München

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)

Alfons-Goppel-Str. 11, D-80539 München

Diese Arbeit wird als Nummer 1 der Schriftenreihe „CGE Reports“ veröffentlicht. Eine elektronische Version ist unter <http://www.cge-munich.de> erhältlich.

E-mail: [info@cge-munich.de](mailto:info@cge-munich.de)

Homepage: <http://www.cge-munich.de>

München, 2012

ISSN 2195-7126

ISBN 978-3-934205-32-1

## **Preface to the *CGE Reports* series**

The Centre of Geodetic Earth System Research (in German: Centrum für Geodätische Erdsystemforschung), CGE, is a collaboration in the field of geodetic Earth system research. The partner institutions, all located in Munich, are

- the Institute of Astronomical and Physical Geodesy (IAPG) of Technische Universität München,
- the Research Facility Satellite Geodesy (Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, FESG) of Technische Universität München,
- the Commission for Geodesy and Glaciology (Kommission für Erdmessung und Glaziologie, KEG), Section Geodesy, of the Bavarian Academy of Sciences and Humanities, and
- the German Geodetic Research Institute (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, DGFI).

CGE was founded by the signing of a cooperation contract on 28 October 2010.

In the process of establishing the CGE, the wish arose to publish its increasingly cross-institutional work in a common publication series. This series, the CGE Reports, is opened by the present issue. The CGE Reports supersede the IAPG/FESG Reports (IAPG/FESG-Schriftenreihe) and the DGFI Reports. By Number 1 of the series, CGE presents its research and development programme approved in November 2011, which is now available in German and English.

Munich, December 2012

## **Vorwort zur Schriftenreihe „CGE Reports“**

Das Centrum für Geodätische Erdsystemforschung (Centre of Geodetic Earth System Research), CGE, ist eine Kooperation zwischen

- dem Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG) der Technischen Universität München,
- der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der der Technischen Universität München,
- der Kommission für Erdmessung und Glaziologie (KEG), Abteilung Erdmessung, der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und
- dem Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI),

alle mit Sitz in München, auf dem Gebiet der geodätischen Erdsystemforschung. Das CGE wurde mit der Unterzeichnung eines Kooperationsvertrags am 28. Oktober 2010 gegründet.

Mit dem Entstehen des CGE entstand auch der Wunsch, Berichte über die Arbeiten der beteiligten Institutionen, die in zunehmendem Maße institutsübergreifend sein werden, in einer gemeinsamen Publikationsreihe zu veröffentlichen. Diese Reihe, „CGE Reports“, wird mit der vorliegenden Ausgabe eröffnet und löst die IAPG/FESG-Schriftenreihe sowie die Reihe „DGFI Reports“ ab. Mit Nummer 1 der CGE Reports präsentiert das CGE sein im November 2011 verabschiedetes Forschungs- und Entwicklungsprogramm, das nunmehr in deutscher und englischer Sprache vorliegt.

München, Dezember 2012







**Centre of Geodetic Earth System Research**

**Research and Development Programme  
2011–2015**

***Forschungs- und Entwicklungsprogramm  
2011–2015***

**Roland Pail, Urs Hugentobler, Reiner Rummel,  
Florian Seitz, Wolfgang Bosch, Detlef Angermann,  
Peter Steigenberger, Thomas Gruber, Johannes Bouman,  
Michael Schmidt, Christof Völksen, Alexander Neidhardt,  
Ulrich Schreiber, Martin Horwath**

**Approved in November 2011**

***Verabschiedet im November 2011***



**Part I**  
**English Version**

***Teil I***  
***Englische Version***



# Contents

<i>Introduction</i> .....	<i>1</i>
<i>Vision, goals and programme</i> .....	<i>2</i>
Geodetic Earth system research .....	2
The vision.....	5
General objectives.....	5
Integration in organisations, services and cooperations.....	7
The programme .....	9
<i>Research Area 1: Geometric Techniques</i> .....	<i>11</i>
Motivation and objectives .....	11
State of the art and previous work.....	12
Programme and themes.....	16
<i>Research Area 2: Gravity Field</i> .....	<i>19</i>
Motivation and objectives .....	19
State of the art and previous work.....	20
Programme and themes.....	23
<i>Research Area 3: Geodetic Earth System Modelling</i> .....	<i>27</i>
Motivation and objectives .....	27
State of the art and previous work.....	27
Programme and themes.....	29
<i>Research Area 4: Methodological Foundations</i> .....	<i>33</i>
Motivation and objectives .....	33
State of the art and previous work.....	34
Programme and Themes .....	35
<i>Research Area 5: New Technologies</i> .....	<i>38</i>
Motivation and objectives .....	38
State of the art and previous work.....	38
Programme and themes.....	39
<i>References</i> .....	<i>47</i>
<i>List of abbreviations</i> .....	<i>51</i>



## Introduction

The Centre of Geodetic Earth System Research (in German: Centrum für Geodätische Erdsystemforschung) was founded by the signing of a collaboration contract on 28 October 2010. CGE is a collaboration in the field of geodetic Earth system the research. The partner institutions, all located in Munich, are

- the Institute of Astronomical and Physical Geodesy (IAPG) of Technische Universität München,
- the Research Facility Satellite Geodesy (Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, FESG) of Technische Universität München,
- the Commission for Geodesy and Glaciology (Kommission für Erdmessung und Glaziologie, KEG), Section Geodesy, of the of the Bavarian Academy of Sciences and Humanities, and
- the German Geodetic Research Institute (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, DGFI).

The process leading to the foundation of CGE was initiated by a recommendation from the German Council of Science and Humanities (Wissenschaftsrat) reviewing the DGFI in 2005. The council recommended intensifying the cooperation between DGFI and TU München, e.g. through joint appointments, and considering a restructuring and streamlining of the geodetic institutions in Munich. In a preparation phase of several years, the scientific and administrative structure of a collaboration, named CGE, was defined. Five research areas (RA1-RA5) embracing the four member institutes are part of this structure.

In accordance with the CGE collaboration contract, the research activities are planned by a common research and development programme and reviewed by an external scientific board in intervals of no more than five years. This document is the first CGE research and development programme for the years 2011 to 2015. It describes the mission and the general tasks of CGE as well as the principal themes and tasks within the individual research areas.

# Vision, goals and programme

## Geodetic Earth system research

*Geodetic Earth system research aims at the comprehensive observation, consistent description, and quantification of processes on our planet, in order to develop a profound understanding of the Earth system. This goal is pursued through the application and further development of geodetic observation techniques and their consistent integration into a geodetic observation system as well as its integration with techniques from other disciplines.*



**Figure 1:** Components of the Earth system and of the geodetic observation system (modified from ESA).



Earth is a restless planet. Its atmosphere, its oceans, its continental water masses, its ice cover, its surface and its interior act and interact in a variety of dynamic processes in a large range of spatial and temporal scales (Figure 1). A growing human population depends on Earth's limited resources and is subjected to Earth's dynamic processes, including natural hazards. At the same time, humankind is changing components of the Earth system including the climate system, without sufficiently understanding those components. There is an urgent need for a better understanding of the Earth system and the interrelations among its components. This need cannot be satisfied without observations of a large suite of essential parameters characterizing the Earth system.

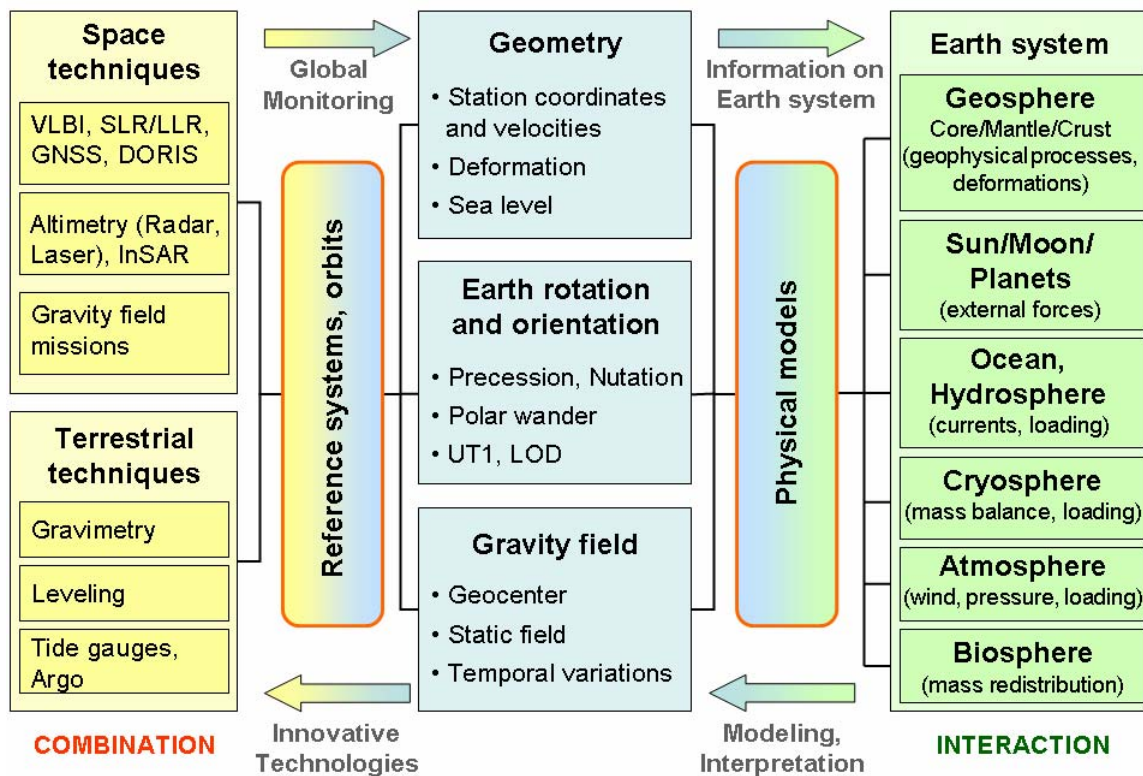
Geodesy with its modern space techniques and satellite methods provides parameters related to the three main fields:

- the geometry of the Earth surface and its changes with time,
- the gravity field and its changes with time, and
- the rotation and orientation of Earth in space.

The geometry of point networks and its temporal deformations are determined by GNSS (Global Navigation Satellite Systems), SLR/LLR (Satellite Laser Ranging/Lunar Laser Ranging), VLBI (Very Long Baseline Interferometry), and DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Earth rotation parameters are derived from the same geometric observation techniques. Satellite altimetry measures the geometry of ocean and ice surfaces. Synthetic aperture radar (SAR) allows the areal determination of surface geometry and its deformations. Satellite gravity missions like GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) and GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) enable the very precise determination of the geoid as a geophysical reference surface as well as of global temporal gravity field variations, allowing the direct weighing of mass redistributions in the Earth system. The atmospheric influences on the electromagnetic signals used by geodetic techniques are explored to infer essential atmospheric parameters.

The processes and phenomena of the Earth system manifest themselves in geodetic parameters. Generally, these processes impact the parameters of more than one of the three main fields of geodesy. For example, mass redistributions between ice sheets and oceans change the geometry of the ice surface, the ocean surface and (by loading effects) the solid Earth. They induce changes in the gravity field and, through changes in the tensor of inertia, also in the Earth rotation. From analysing a single type of geodetic observation, only part of the geodetic signals induced by an Earth system process may be captured, and usually such partial signals may not be distinguished from signals of different processes. Therefore, the approach of geodetic Earth system research is to combine all relevant geodetic techniques and to thereby determine consistent sets of geodetic parameters for a comprehensive description of the Earth system. The definition of such parameter sets builds on physical, mathematical and numerical models that describe the phenomena and processes in the components of the Earth system, their interactions, and their effects on geodetic observations (geodetic Earth system modelling). Inevitably, such models depend on, and have to be consistent with, methods and data from other disciplines.

It is therefore a defining element of geodetic Earth system research to explore and exploit the close connections between the process of geodetic observation and analysis and the study of Earth system processes by neighbouring disciplines (Figure 2). Geodetic observations determine parameter sets and time series about the surface geometry, the gravity field, Earth rotation and orientation. These geodetic parameters are incorporated into models of Earth system processes and thereby help to improve the process understanding. Conversely, improved models of the



**Figure 2:** Interrelations between the geodetic techniques (left) and the components of the Earth system (right) through the geodetic parameter groups (centre) (after Rothacher 2008, modified).

dynamic Earth system processes enable an improved analysis and interpretation of geodetic measurements, which in turn spurs innovations in geodetic observation techniques, data registration and analysis, leading to more accurate and more consistent geodetic results for Earth system research.

In 2003, the International Association of Geodesy (IAG) decided to establish the Global Geodetic Observing System (GGOS, Plag und Pearlman 2009), aiming at the integration of geodetic observations in a uniform, global, and long-term reference system in order to monitor geodetic parameters with a relative accuracy of at least  $10^{-9}$ . GGOS is geodesy's contribution to the understanding and monitoring of Earth system processes, and in particular of global change.

## The vision

By observing the Earth figure, its orientation and its gravity field in space and time, geodesy provides the metric data basis for Earth system research. Owing, in particular, to modern space techniques, phenomena like sea level rise, the melting of continental ice masses, changes in global water circulation and in the atmosphere, solid Earth deformations and many others become visible in their global nature and measurable in their spatial and temporal patterns.

Geodesy is driven by the urgent societal need for understanding the Earth system and global change, as well as by numerous needs for practical geodetic applications. Geodesy takes advantage of the rapid development of geodetic space techniques and information technology. Geodesy also benefits from a rapid development in time measurement: Most geodetic techniques rely on the measurement of signal travel times, and a new quality of time measurements promises new applications. Geodesy is literally on the pulse of space and time.

The CGE vision is an optimal contribution of geodesy to a reliable and precise description of the Earth system. This description comprises the state and the processes of the Earth system, including processes of global change and process predictions. The contribution of geodetic Earth system research consists in the full exploitation of the potential of geodetic observation techniques through their consistent combination and their consistent coupling to models and observations of neighbouring disciplines.

## General objectives

By coordinating the research activities of DGFI, IAPG, FESG, and KEG (Section Geodesy) within CGE, a novel centre of geodetic research is being established on the international level. CGE benefits from important synergies and new opportunities. CGE aims at essentially contributing to the realisation of the outlined vision through excellent research and development and through the participation in international geodetic services.

The following general objectives are pursued:

**Covering the complete process of measurement and analysis.** Given the link with the Geodetic Observatory Wettzell and with the joint research programme of the partners dealing with this observatory, CGE is in the state to cover the entire processing chain from the measurements up to the modelling and interpretation. CGE proactively contributes to research and development about this chain of observation and analysis, in particular by exploiting feedbacks between developments in the individual processing stages.

**New gravity field observations.** Novel approaches of satellite gravimetry have been developed and realised for the observation of the global gravity field. Thereby, a new segment of Earth system observations, sensitive to the mass distribution and mass transports, has emerged. These new techniques have to be consistently combined with complementary data sources such as altimetry, SLR and terrestrial gravimetry in order to produce models with high resolution. The objectives are to further develop this segment, to fully exploit its potential and to define strategies for future missions.

**GNSS and further satellite missions.** The navigation satellite systems GPS and GLONASS as well as the future Galileo and Compass systems form polyhedrons of satellites equipped with atomic clocks orbiting around the Earth. In conjunction with the dense networks of terrestrial receivers, the emerging positioning and navigation systems offer an enormous potential for science and

application. The electromagnetic waves transmitted by the satellites traverse the outer space of the Earth, allowing for a near-real-time tomographic sounding of the atmosphere with high spatial and temporal resolution. In addition, a number of systems of low Earth orbiting satellites are in operation or planned, serving to foster gravity field and tropospheric research. The potential and the synergies of, and among, these techniques have to be investigated, further developed, and utilised.

**Terrestrial and airborne validation and densification.** The maturity of geodetic space techniques poses new important tasks to terrestrial and airborne geometric and gravimetric observation systems. For the calibration and validation of the satellite systems as well as for the interpolation and regional densification, these systems will gain growing importance in the coming years. Related methodological investigations and applications have to be pursued.

**Developments of theory.** The progress in observation and analysis must be accompanied by respective developments in methodology. Theoretical foundations are to be re-formulated in view of the rapid development of geodetic observation techniques. Without accepting the great challenges posed to geodetic theory, it will be impossible to take full advantage of the technological potential of future measurement systems.

**Provision of data products.** As a result of the analysis of geometric and gravimetric observation data, high-precision data products (global and regional reference frames, global and regional gravity field models) have to be provided according to the needs of the international science and user community. CGE will thereby continue to contribute essentially to scientific services of the IAG.

**Consistent combination.** The goal is to measure the three subjects of geodesy, namely the Earth surface geometry, the rotation of the Earth and the gravitational field of the Earth, with an accuracy of a few millimetres in a consistent and long-term stable reference system. By the consistent combination of complementary geometric and gravimetric information, deformation signals and mass variation signals have to be detected and to be jointly interpreted.

**GGOS.** By the decision taken in 2003 to establish the GGOS, the international geodetic community posed itself a formidable task. GGOS is important for securing the future of society in the context of global change. CGE members are among the initiators and creators of GGOS and assumed responsibility for pivotal tasks within its scientific services. CGE members are also actively involved in the organisational structures of IAG and GGOS. In the framework of CGE, the respective tasks are to be fulfilled in accordance with the scientific and societal goals of GGOS. At the same time, important feedbacks arise for the training of future geodesists.

**Development of new technologies, time measurement,  $10^{-10}$ -geodesy.** The development in time measurement on the relative accuracy level of  $10^{-18}$  opens the prospect of a future geodesy on the relative accuracy level of  $10^{-10}$ , that is, even higher than the GGOS specification of  $10^{-9}$ . This prospect includes new Earth system research opportunities ranging from atmospheric physics to solid Earth geophysics and planetary studies. Research and developments on the realisation of this potential have to be pursued.

**Orientation towards the Earth system, interlinks with neighbouring disciplines.** Geodetic theories, methods and models must be qualified for their incorporation into Earth system models. Therefore, an interdisciplinary approach in close cooperation with other branches of geosciences is mandatory. Geodetic Earth system research contributes to Earth system modelling through measuring and quantifying Earth system states and variations and through aiding their interpretation. At the same time, the geodetic processing and analysis chain takes vital advantage from improved models of Earth system components.

**Outreach and publications.** The gained data and results must be delivered in an appropriate manner to scientific users of other disciplines, to the public, and to political decision-makers. Only by these means can geodesy contribute its share to the ongoing discussion on global change and convey the importance of geodesy in this discussion.

**Applications.** The technological developments used and brought forward by geodetic research also open new horizons for practical applications, such as for high-precision navigation and positioning, traffic guidance systems, surveying and geo-information technologies, global data infrastructure, data transfer, and communication. Respective synergies for practical applications should be used.

## Integration in organisations, services and cooperations

CGE essentially contributes to the commissions and scientific services of IAG and to other international integration projects. Research results directly enter the work of the services, and results from the products and services give feedbacks to further research. The following activities may be highlighted.

### IAG (International Association of Geodesy)

- Sub-Commission 2.3: Satellite Gravity Mapping Missions: President
- Commission 4 Study Group SG 4.2: Ionosphere Modelling and Analysis: Chair
- Inter-Commission Study Group IC-SG11: Methodology of regional gravity field modelling: Chair
- Inter-Commission Study Group IC-SG13: Multi-sensor combination for the separation of integral geodetic signals: Chair

### GGOS (Global Geodetic Observing System)

- Bureau for Standards and Conventions: Chair
- Working Group for Satellite Missions: Co-Chair

### IERS (International Earth Rotation and Reference System Service)

- ITRS Combination Centre

### IGS (International GNSS Service)

- IGS Chair
- Operation of GNSS stations
- Member of the CODE IGS Analysis Centre (Reprocessing)
- Regional Network Analysis Centre for Europe (RNAAC-EUREF)
- Regional Network Analysis Centre for Latin America (RNAAC-SIR)
- GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring (TIGA): Analysis centre
- Antenna Working Group: Chair

### ILRS (International Laser Ranging Service)

- Operation of SLR Stations (together with Federal Agency for Cartography and Geodesy, BKG)
- Data and Operations Center (EDC)
- Analysis Centre

**IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)**

- Operation of VLBI Stations (together with BKG)
- Analysis centre
- Combination centre (together with BKG)

**IAS (International Altimetry Service)**

- Leader of the service establishment

**IAU (International Astronomical Union)**

- Commission 19: Rotation of the Earth: Secretary

**EGU (European Geosciences Union)**

- Division on Geodesy: Vice-president

**European GOCE Gravity Consortium (EGG-C)**

- Leader

Part of the works at FESG, IAPG and DGFI are integrated in the programme of the **Research Group for Satellite Geodesy** (Forschungsgruppe Satellitengeodäsie, FGS), together with BKG and the Institute of Geodesy and Geoinformation (IGG) of the University of Bonn. Consequently, the goals presented here overlap with the FGS research programme 2011-2015. Additional cooperations are mentioned in the presentation of the research areas.

## The programme

The CGE programme is subdivided into five research areas:

### 1 Geometric techniques with the themes

- (1) Measuring system, data acquisition and provision
- (2) Model development and analysis of geometric space techniques
- (3) Analysis and enhancement of combination methods
- (4) Computation of consistent global and regional reference frames
- (5) Application strategies

### 2 Gravity field with the themes

- (1) Observation systems and sensor analysis
- (2) Simulation processes
- (3) Theory and measurement preprocessing
- (4) Regional and global modelling
- (5) Application strategies

### 3 Geodetic Earth system modelling with the themes

- (1) Multi-sensor analyses
- (2) Earth system models
- (3) Atmosphere
- (4) Hydrosphere
- (5) Cryosphere
- (6) Solid Earth

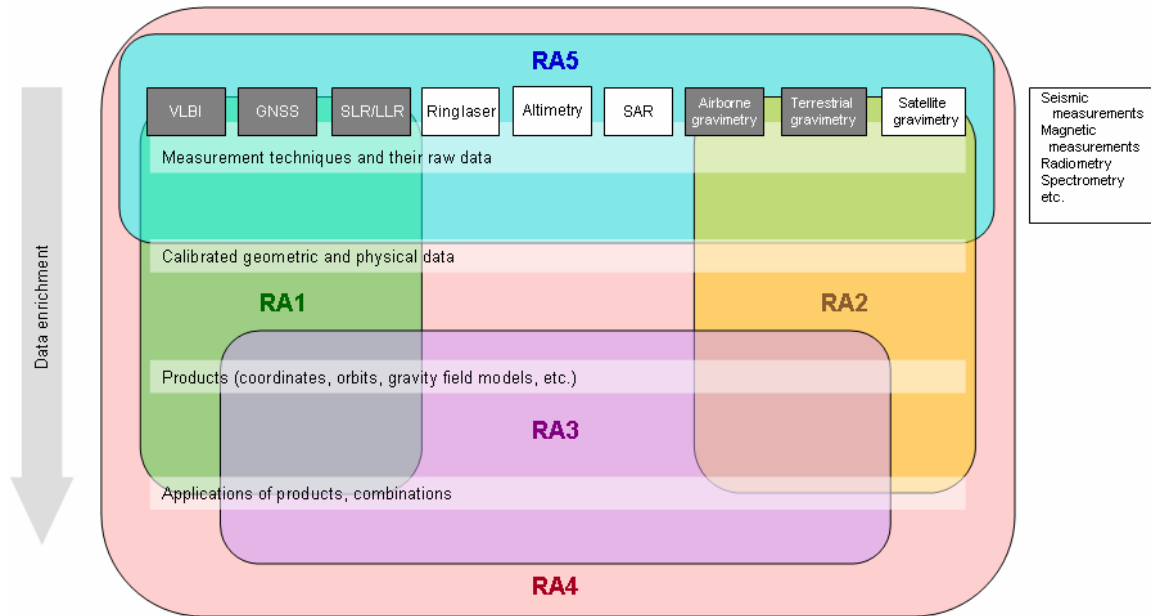
### 4 Methodological foundations with the themes

- (1) Numerics, algorithm development and parameter estimation
- (2) Computer sciences
- (3) Simulation of new sensor technology
- (4) Standards and conventions
- (5) Combination of complementary methods for the GGOS

### 5 New technologies with the themes

- (1) Time and frequency
- (2) VLBI
- (3) SLR/LLR
- (4) GNSS
- (5) Ring laser
- (6) Automation and remote control
- (7) General infrastructure and other technologies

Each research area comprises themes that demand a common cross-institution coordination. Obviously, none of the research areas may work in isolation. Numerous interlinks are essential to pursue the general CGE goals. Already a single research and development task may concern two or more research areas and may therefore need the coordination by all concerned research areas. Figure 3 illustrates the domains and interlinks of the research areas through their relation to steps of geodetic data acquisition and analysis.



**Figure 3:** Scheme relating the CGE research areas to steps of geodetic data acquisition and analysis. The vertical order (arrow on the left) is by the different steps. Measurement techniques (top) provide raw data (such as travel times, voltage). Measurement techniques operated within CGE are grey-shaded. The subsequent analysis steps provide calibrated geometrical or physical data, products (like coordinates, orbits, gravity field models, etc.) and finally applications and product combinations. Coloured boxes locate the research areas within this analysis chain.



## Research Area 1: Geometric Techniques

### Motivation and objectives

The space geodetic observation techniques, such as Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite and Lunar Laser Ranging (SLR/LLR), Global Navigation Satellite Systems (GNSS) comprising GPS, GLONASS and the future Galileo system, Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) as well as satellite altimetry provide the basis for the work within this research area. These observation techniques allow a high-precision continuous determination of the figure of the Earth along with its temporal variations. Thus, geodesy provides valuable information to identify and quantify smallest variations in space and time, e.g., as indicators of global change and for near-real-time warning systems. For this aim, highest accuracies for the full processing chain of the space geodetic observations as well as highly accurate, consistent and long-term stable geodetic reference frames with highest reliability are a fundamental requirement and goal.

The Research Area 1 “Geometric Techniques” (RA1) is primarily concerned with the determination and analysis of geometric parameters describing the shape and orientation of the Earth. With the inclusion of the research activities and developments of the Geodetic Observatory Wettzell, jointly operated by the Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG) and the Research Facility Satellite Geodesy (FESG), the complete processing chain is covered: Observation techniques and procedures, data acquisition and provision, development of models and data analysis, parameter determination and combination as well as the realisation of geodetic reference systems.

As an important requirement for the data analysis and combination, identical constants, conventions and models have to be applied and a parameter estimation without distortion has to be ensured. Realistic physical models have to be applied, and their parameters need to be estimated in consistent reference frames from the space geodetic observations. The combination methods on the level of original observations (or constraint-free normal equations) has to be further improved to fully exploit the strengths of the individual observation techniques and to eliminate their weaknesses. In this context, the integration of the different observation techniques, the datum definition and an improved consideration of time-dependent parameters are of crucial importance. The parameters of the terrestrial reference frame (station positions and their temporal variations) and of the celestial reference frame (quasar positions) together with the linking Earth orientation parameters (EOP) are to be estimated consistently in a rigorous adjustment. This requires investigations concerning the choice of optimal datum conditions, the impact of the network geometry, as well as the development of suitable methods for integrating the different space techniques and handling the non-linear station motions. For the satellite techniques, the low-degree spherical harmonic coefficients of the Earth gravity field should be included in the parameter estimation to achieve consistency between geometric and gravimetric quantities.

A key aspect in this research area is the collaboration of CGE in the scientific services and projects of IAG, which will be continued in the future. There is a close interaction between the basic research tasks and the collaboration in the IAG Services, and therefore both activities benefit from each other. CGE provides a valuable contribution to deliver geodetic products of highest quality and accuracy for the worldwide user community in science and practice. The collaboration in the scientific services includes the operation of observation stations, the acquisition, archiving and distribution of the observations as well as the data analysis and the generation of geodetic prod-

ucts. These activities in turn benefit the general research goals of CGE. Finally, the work within this research area provides valuable geodetic contributions for the realisation of the GGOS goals.

The data and results of the geometric techniques not only contribute to the computation of geodetic reference frames, but also provide the basis for various investigations of Earth system processes. For example, the processing of satellite altimetry data is the basis for investigations of global sea level variations, modelling of ocean tides and the detection of geostrophic ocean currents (see RA2, Figure 8).

## State of the art and previous work

Research in the field of geometric observation techniques as well as the enhancement of analysis strategies and combination methods for the generation of geodetic products is pushed to a large extent by the commissions and scientific services of IAG. These are in particular the IAG Commission 1 “Reference frames”, Commission 4 “Positioning and Applications” as well as the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), the International GNSS Service (IGS), the International Laser Ranging Service (ILRS), the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) and the International DORIS Service (IDS). The International Altimetry Service (IAS) is currently in the installation phase under the leading role of a CGE scientist. Satellite altimetry has an inter-divisional character: The precise observation of the surface of the oceans by satellite altimetry provides not only information about two thirds of the figure of the Earth, but also delivers high-resolution gravity field data (see RA2).

The overall activities and tasks in the field of geometric observation techniques are coordinated worldwide within the technique-specific IAG Services (IGS, ILRS, IVS, IDS). For each of these services, various components have been established, such as coordinating offices, observation networks, operation centres, data centres as well as analysis and combination centres, to which CGE contributes with many functions and long-term commitments. During the last years, a remarkable progress has been made, leading to an enhancement and improvement for the space geodetic observation techniques, analysis and combination methods as well as for the generation of geodetic products (e.g., station coordinates, Earth orientation parameters, satellite orbits). However, the standards, conventions and models used for the data analysis are not yet fully homogenised on the international level, and this is a limiting factor for the reliability and consistency of the geodetic results. The IERS is responsible for the computation of the International Celestial Reference Frame (ICRF), the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) and the linking Earth Orientation Parameters (EOP) from a combination of the space geodetic observations by using the latest set of IERS Conventions, i.e., the IERS Conventions 2010 (Petit and Luzum 2010). The latest realisation of the terrestrial reference frame is the ITRF2008, which has been computed by two ITRS combination centres, the Institut Géographique National (IGN) in France and DGFI, through a combination of VLBI, SLR, GNSS und DORIS time series of station positions and EOPs (Altamimi et al. 2011, Angermann et al. 2010, Seitz et al. 2012). The latest realisation of the celestial reference system is the ICRF2.

Although significant progress has been achieved concerning the methodology and accuracy for the computation of the IERS products, there still remain some deficiencies. One major problem for the computation of the terrestrial reference frame is the suitable handling of the non-linear station motions. At present, the station motions are represented by constant velocities, whereas seasonal signals and episodic or abnormal effects are not considered. As a consequence of this approach, the real station position at a certain epoch may not be represented by the ITRF coordinates. The resulting errors, e.g. caused by annual loading variations at many stations, may

reach a level of 2 cm and are therefore much higher than the measurement accuracy. The kinematics of the ITRF refers to the geological-geophysical model NNR-Nuvel-1A. However, this model is not valid for the present time with the required accuracy, since it represents a long-term average over millions of years, and it does not include deformation zones of the Earth. Other challenges are posed by the integration of the different space techniques in view of a sub-optimal geographical distribution of high quality co-location sites as well as by the datum realisation for the terrestrial reference frame computations. At present, the scale of the ITRF is realised by SLR and VLBI observations and the origin is realised by SLR only, which is problematic because of the relatively sparse networks for both techniques. As another deficiency, the terrestrial and the celestial reference frame are currently estimated independently by the responsible IERS product centres, which may cause inconsistencies between both frames. Moreover, the ICRF is based solely on VLBI data and it is computed by one analysis centre only (without any combination).

CGE has a long-standing and profound expertise in the field of geodetic reference systems and geodetic observation techniques. With the inclusion of the Geodetic Observatory (GO) Wettzell, the full processing chain from the geodetic observations to the generation of geodetic-geophysical parameters is well covered. The installation and operation of the new Satellite Observing System (SOS-W) and the TWIN Radio Telescope (TTW) provides the basis for the development of new observation and data analysis concepts (see Figure 4).

The existing expertise at CGE and the available software packages provide an important precondition to accomplish the research tasks within this research area (see Table 1). For the analysis of observations of each of the geometric techniques (VLBI, SLR, GNSS) at least one software



**Figure 4:** VLBI und SLR stations at the Geodetic Observatory Wettzell (picture: Neidhardt 2011).

**Table 1:** CGE analysis software used in Research Area 1 “Geometric Techniques”.

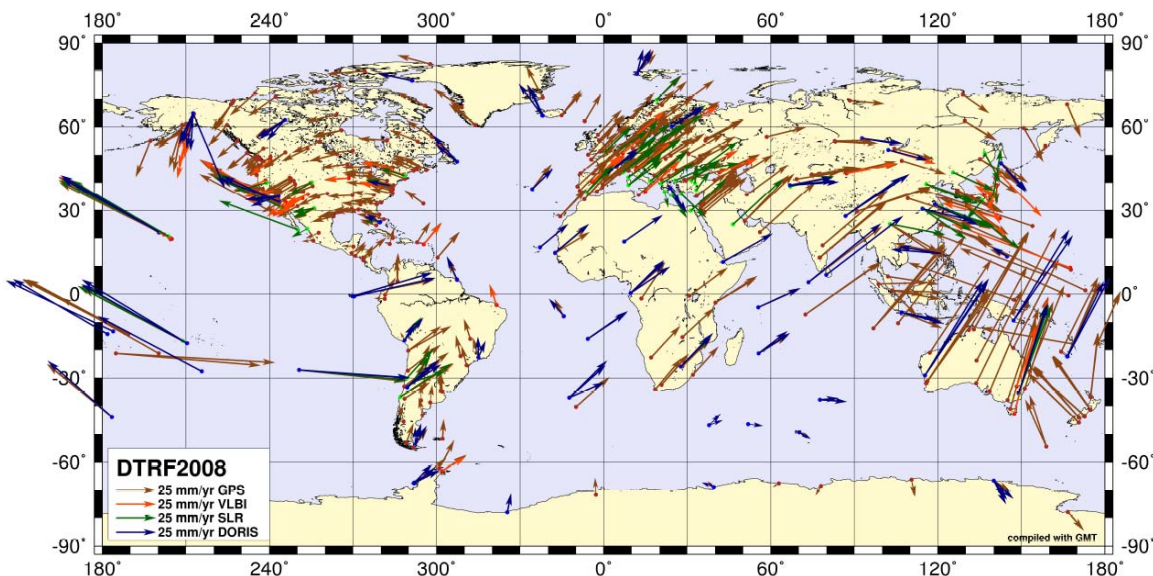
Institution	Software	Observation techniques, short description
DGFI	Bernese GPS Software	Analysis of GPS data, SIRGAS, TIGA and Alpine network
DGFI	OCCAM/DOGS-RI	Analysis of VLBI data, IVS Analysis Centre
DGFI	DOGS-OC	Analysis of SLR data, ILRS Analysis Centre
DGFI	DOGS-CS	ITRS and IVS Combination Centres
DGFI	Altimetry software	Altimetry, manifold applications
FESG	VLBI field system	Field software for operating VLBI antennas (FESG, BKG)
FESG	SLR software	Field software for operating SOS-W (BKG, FESG)
FESG, IAPG	Extended Bernese GPS Software	Global GNSS solutions, IGS reprocessing, combined GNSS, SLR, VLBI data analysis on the observation level
KEG	Bernese GPS Software	GPS, EUREF Analysis Centre, contributions to the IGS, Geodynamics (Iceland und Alps)
KEG	GIPSY	GPS, comparison of results

package is available. For many years, DGFI has developed and applied the DOGS-CS software for the combination of space geodetic observations and the ITRF computations. Furthermore, CGE disposes about the combination software ADDNEQ2 of the Bernese GPS software. Thus, a thorough analysis and control of the combination results is possible within CGE.

Through the participation of CGE in various scientific programmes, important preliminary work has been accomplished for this research area. This includes the enhancement of the combination methods as well as the installation of the ITRS Combination Centre within the IERS-project, which has been funded by the Federal Ministry for Education and Research (BMBF) and the German Research Foundation (DFG). In its function as an ITRS Combination Centre, DGFI has computed combined solutions for the two latest realisations of the terrestrial reference system, ITRF2005 and ITRF2008. For that purpose time series of station positions and EOPs of the space techniques VLBI, SLR, GNSS and DORIS over long time spans (up to 28 years) were combined on the level of datum-free normal equations. The combination methodology applied at DGFI and the ITRF results are presented in various publications (Angermann et al. 2009, Seitz 2009, Seitz et al. 2012). Figure 5 shows the horizontal station velocities of the DGFI solution DTRF2008 (Seitz et al. 2012).

The IERS project provided the basis for the follow-up project GGOS-D (Rothacher et al. 2011). In this German project with strong CGE involvement, a considerable methodological progress could be achieved compared to the status-quo on the international level. A major outcome of GGOS-D were the generation of homogeneously reprocessed observation time series of the different space geodetic techniques based on unified standards and models, a common adjustment of the terrestrial and celestial reference frame and the computation of consistent time series of geodetic-geophysical parameters. The extensive reprocessing of the global GPS data was performed jointly by GFZ Potsdam, TU München and TU Dresden (Steigenberger et al. 2006). A focus within GGOS-D was on the analysis and comparison of station position time series of the different space techniques. Figure 6 displays the average annual signals of the height components of 12 GPS and VLBI co-location sites (Tesmer et al. 2009). Besides the geometric space techniques VLBI, SLR and GPS, also satellite altimetry data were homogeneously processed within GGOS-D to generate time series for the variations of the sea level and the Earth gravity field parameters.

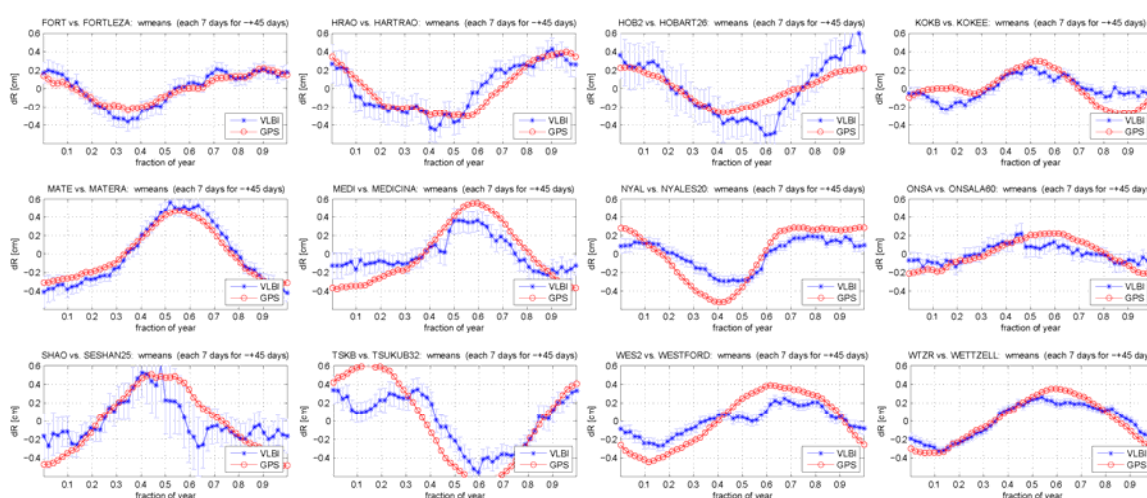




**Figure 5:** Horizontal station velocities of the terrestrial reference frame solution DTRF2008.

Important foundations for the work within this research area have been also laid through the CGE participation in the DFG research unit “Earth Rotation and Global Dynamic Processes” as well as through the preparations for the DFG research unit “Space-Time Reference Systems for Monitoring Global Change and for Precise Navigation”, which has been established in autumn 2011 (Nothnagel et al. 2011).

Furthermore, for many years CGE has worked in the field of regional reference frames, has participated in the TIGA project for tide gauge monitoring and has operated seven GNSS stations in the Alpine region for monitoring deformation processes. In the framework of SIRGAS, DGFI is active in South and Central America (Sanchez et al. 2010, Seemüller et al. 2010). The Section



**Figure 6:** Mean annual signal in the height component of 12 co-location sites obtained from homogeneously processed VLBI and GPS observation time series.

Geodesy of the Commission for Geodesy and Glaciology (KEG) participates in the EUREF activities as an analysis centre and coordinates the EUREF project “EPN Reprocessing” (Völksen 2009). At the same time this group is involved in deformation networks in Iceland and the Alps and is in charge of the operation of permanent GNSS stations in these networks.

## Programme and themes

The planned activities in RA1 “Geometric Techniques” are based on CGE’s long-time expertise in the area of geodetic reference systems and space geodetic techniques. The participating institutions have already collaborated in several research programmes and cooperative projects. The focus of the planned activities is significantly influenced by these collaborations.

The programme includes both basic research and the participation in the commissions and scientific services of IAG. CGE is involved in different tasks of the geometric services (see overview on page 7f). The CGE contributions to the IERS and the technique-specific services IGS, ILRS, and IVS are particularly important for RA1. On the one hand, research results are directly introduced into the activities of the services. On the other hand, results based on the products of the services help to identify further areas of research.

The activities in RA1 are structured in five themes. The collaboration in the commissions and services of the IAG covers all these themes.

### **(1) Measurement systems, data acquisition, and provision**

CGE is deeply involved in VLBI, SLR, and GNSS operations at the GO Wettzell. Operations and data acquisition of the new Satellite Observing System Wettzell (SOS-W) and the TWIN Radio Telescope Wettzell (TTW) are a key issue within this theme. Furthermore, this theme includes the operation of continuous reference stations at tide gauges within the IGS tide gauge (TIGA) working group, the Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS), and in the Alps. Data of these GNSS stations are archived and provided by CGE. CGE also operates the EUROLAS Data Center (EDC), a global data centre of the ILRS. Methods for data acquisition and provision have to be continuously improved to fulfil the growing data management demands.

### **(2) Model development and analysis of geometric space techniques**

The analysis of geometric space techniques is based on the software packages available at CGE: the Bernese GPS Software for GNSS, DOGS-OC and Bernese GPS Software for SLR, OCCAM/DOGS-RI and enhanced Bernese GPS Software for VLBI. For DORIS, normal equations or solutions are available from cooperation partners or the International DORIS Service (IDS). At the moment there are still systematic differences between the various software packages regarding the handling of physical models and mathematical parametrisation. CGE aims at a unification of standards, modelling and parametrisation within the different software packages. This is a prerequisite for a consistent combination of the different techniques. Model updates have to be implemented to comply with a state-of-the-art data processing. Analysis of physical models concentrates on atmospheric refraction, atmospheric loading, impact of solid Earth and ocean tides (including loading effects) on satellite orbits and station coordinates, low-degree spherical harmonics of the Earth’s gravity field, as well as the mathematical modelling of variations of the Earth orientation parameters. The empirical models currently used for GNSS-based orbit determination should be further improved. This is a key issue for reducing draconitic periods visible in different GNSS-derived

parameter time series. In addition, high-quality radiation pressure models have to be developed for the Galileo satellites as well as for new GPS block types. A further task within this theme is the consistent processing of altimeter data. This requires continuous harmonisation and calibration of a 20-year data set of altimeter observations (Dettmering and Bosch 2010).

### **(3) Analysis and enhancement of combination methods**

The combination of the geometric space techniques is done at CGE with unconstrained normal equations (DOGS-CS at DGIF) or at the observation level (enhanced Bernese GPS Software at IAPG/FESG). The combination of GNSS data is done with the ADDNEQ2 program of the Bernese GPS Software. Key aspects are the improvement and refinement of combination methods as regards weighting, non-linear station motion, and datum definition. These topics are covered by the DFG research unit “Reference Systems”. Methods for datum definition should be further improved by including GNSS and low Earth orbiter observations and applying improved satellite orbit models. Another important task is the connection of the global networks of different observing techniques. Local terrestrial surveys (local ties) between co-located instruments serve for this purpose. The quality of the combination results essentially depends on the selection of appropriate stations. The strategy for this selection process should be further improved. The potential of further common parameters as well as co-locations on satellites for stabilising the combination of the different techniques should be studied. Examples for further parameters are troposphere parameters and clock corrections. The enhanced Bernese GPS Software can be used to include these parameters for a combination on the observation level. The combined processing of GNSS and VLBI observations is of particular importance. A further important task is the development and implementation of appropriate methods for combined epoch reference frames, e.g., on weekly or monthly basis. Challenges are the combination of the techniques as well as a stable datum realisation for these epoch solutions. A main goal is the development of appropriate combination methods for a consistent estimation of celestial and terrestrial reference frame as well as the EOPs.

### **(4) Computation of consistent global and regional reference frames**

A research focus is on the computation of the terrestrial reference frame. Since 2001, DGFI has been one of the ITRS combination centres of the IERS. In addition to the official ITRF computations, new research results and refined combination methods should be applied to improve the realisation of the global reference system. A further goal is the combined estimation of celestial and terrestrial reference frames. This is done in collaboration with BKG within the project “Consistent celestial and terrestrial reference frames by improved modelling and combination” of the DFG research unit “Reference Systems”. In addition to the combination of multi-year normal equations, epoch reference frames are to be computed. The results of both approaches have to be compared and analysed. The fourth theme includes basic research on regional reference frames as well as the computation of regional reference frames for Latin America and contributions to the European reference frame (EUREF). A further task is to continue the analysis of a global GNSS tide gauge (TIGA) network as a basis for a global unified height system.

### **(5) Application strategies**

Time series of geodetic-geophysical parameters have to be derived from the geometric techniques as input for Earth system research (RA3) and combination with gravity field parameters (see RA2 and RA4). The high precision and long-time stable reference frames dis-

cussed above in Theme 4 are a prerequisite for the generation of consistent and interpretable time series. Time series of station coordinates, Earth orientation parameters, and atmospheric parameters from GNSS, VLBI, and SLR/LLR are then to be made available for Earth system research. Satellite orbits are essential for linking geometry and gravity field (see RA2 and RA4). The focus of the satellite altimeter data should be put on the improved retrieval of altimeter measurements to determine the geometry and kinematics of the sea surface (see RA3). The inclusion of new missions like CryoSat-2, SARAL, Sentinel-3 is an important task in view of the involved new sensors with improved resolutions, allowing for new applications in sea ice and coastal areas. Results of new altimeter missions as well as ICESat laser altimetry should be retrieved to determine the geometry and geometry changes of continental ice masses in Greenland and Antarctica. The opportunities of imaging SAR missions like TerraSAR-X and TanDEM-X for cryospheric applications should be analysed in collaboration with DLR. Due to its high spatial resolution, SAR is an ideal complement to point positioning techniques (like GNSS) and altimetry for the determination of topography and surface deformations.



## Research Area 2: Gravity Field

### Motivation and objectives

The gravity field serves as a reference surface for a variety of dynamic processes in the Earth system. At the same time it also reflects mass distribution and mass variability caused by geophysical processes. Examples for research areas that benefit from a better knowledge of the Earth gravity field are geodesy, geophysics, oceanography, glaciology, and navigation. Therefore, the observation, determination and modelling of the static and time variable Earth gravity field on global and regional scales and with different spatial and temporal resolutions represents a central goal of the CGE activities, and is linked in many aspects with the other four CGE research areas.

For the determination of the Earth gravity field it is of decisive importance to gain in-depth knowledge about its theory and its applications and about different sensors used for its observation. This includes observation systems operated in space, on airplanes and on the Earth surface. Apart from improving well-known measurement techniques and from detailed sensor analysis, new sensor concepts need to be developed. For this aim, simulators have to be developed or improved in order to enable realistic and well founded conclusions for future observation and mission scenarios. These tasks are closely linked to the work performed in RA4, where basic research about simulators for new sensor systems will be done. The fundamental theory for making use of these observations needs to be further developed so that the available highest precision measurements can be used in a joint approach for gravity field determination. For this aim, regional and global analysis methods have to be further developed, such that corresponding models of the Earth gravity field can be computed from preprocessed data. Their accuracy and resolution in space and time should only be limited by the measurement errors and the data distribution. In cooperation with user communities, application strategies for the global and regional models are to be developed in order to further manifest their importance in Earth system sciences.

With respect to GGOS, important tasks in this research area are: the consistent processing of low degree gravity field coefficients contributing to the definition of the global datum (coordinated by the Bureau of Standards and Conventions and together with RA1), the application of the geoid as physical reference surface (height systems), the observation of mass transport processes, as well as the establishment of future gravity field missions as part of the GGOS observation concept.

RA2 has close thematic links to all other CGE research areas, which implies that several tasks identified in this research plan will be jointly performed. Examples are: joint determination of geometry and gravity field; gravity field and datum; gravity field as an element of Earth system research; joint efforts in methodological developments; analysis of new sensor systems for gravity field determination.

## State of the art and previous work

### (1) Observation systems and sensor analysis

Gravity field determination uses data from observation systems based on satellites, air-planes and the Earth surface. Currently the following sensor systems are in operation: orbit observations between satellites (Satellite-to-Satellite Tracking, SST), satellite gradiometry, satellite altimetry, and airborne and terrestrial gravimetry. Global gravity field models are mainly based on SST and gradiometry, sometimes complemented by terrestrial and airborne gravimetry and by marine gravity information derived from altimetry. The latter data sources are used to significantly enhance the limited spatial resolution of satellite-based models. For satellite methods (SST and gradiometry) various techniques have been developed in the frame of the GRACE and GOCE missions in order to better understand the error behaviour of the sensors and their coupling with other satellite components, like, for example, attitude control and electronics, but also in order to improve the understanding of possible exchange mechanisms with geophysical states and processes in the high atmosphere (Peterseim et al. 2011). For this purpose, software for processing GRACE SST and GOCE gradiometry raw data is available, which can be upgraded for further investigations (Frommknecht 2008, Stummer et al. 2011). Satellite altimetry is not primarily a gravity field observing system, but gravity anomalies or gravity gradients can be derived by specific methods. In order to apply these methods in a reasonable way, detailed knowledge about the characteristics of altimeter data is needed, which could be achieved in the frame of the previous work performed for the harmonisation of altimeter missions data. For airborne gravimetry, two alternative technological concepts are applied in the international community: measurements taken by specific one-axis airborne gravimeters on stabilised platforms, or processing of data observed with a Strapdown Inertial Navigation System (SINS). Within CGE, a SINS system is available and has been used in first experiments (Gerlach et al. 2010). For terrestrial gravimetry, gravity data from different sources are available, which are applied for various investigations, and which need to be characterised in detail. Terrestrial gravimeters available within CGE were investigated in detail in order to identify their individual performances. In particular the setup and maintenance of a gravimetric reference line in Garmisch-Partenkirchen (Eibsee-Zugspitze) should be mentioned, where results and performances of gravimeters from a number of institutions were inter-compared.

### (2) Simulation processes

For the realisation of the current gravity field satellite missions GRACE and GOCE, the availability of simulators was a precondition. They were used prior to the realisation of the missions in order to estimate the gravity field accuracy and resolution achievable with the designed instrumentation, or in other words, to assess which static and time-variable geophysical signals could be observed. In particular, a semi-analytical simulator on the basis of error propagation was developed, which can provide very quick estimates about the performance of various satellite and instrument scenarios. This simulator is in operation and is currently applied for studies about future gravity field missions (Murböck, 2011). In addition, a closed-loop simulator based on full normal equation systems is available. It can be used for investigating the performance of gravity field determination in a controlled environment comprising the steps from signal generation up to parameter estimation and applying any static or time-variable gravity field signal, observation technique, and satellite formation. In particular, also coloured noise of the measurement system can be simulated. With this simulator, not only the noise can be analysed, but also signals from a forward computation can be introduced in order to investigate the recovery of individual geophysical signals from a specific instrument and satellite configuration. A possible input to this closed-

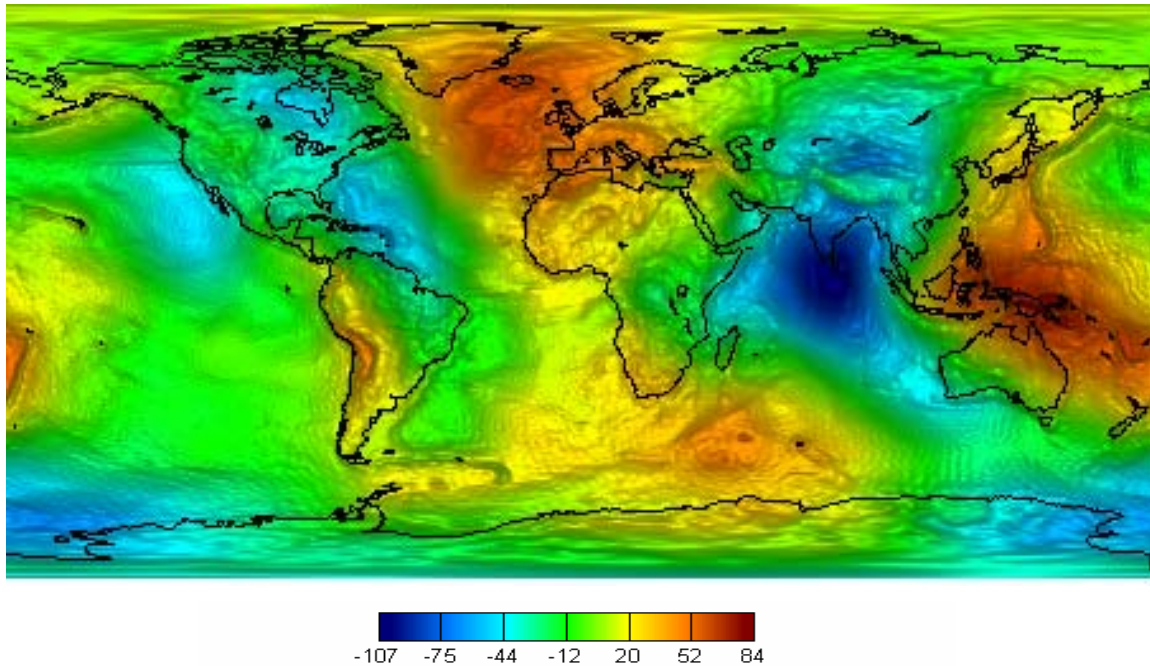
loop process is given by a synthetic time-variable gravity field for a 12-year period with 6 hourly resolution simulated on the basis of coupled geophysical models of the atmosphere, the oceans, the continental hydrology, the cryosphere and solid Earth processes (Gruber et al. 2011a). These data together with the two simulators represent the basis for further developments, not only for satellite mission simulations but also for assessing gravimetric and altimetric information requirements for the future static and time variable gravity field modelling.

### **(3) Theory and measurement preprocessing**

The preparation of K-band distance measurements from the GRACE mission has been specifically investigated for the impact of atmospheric mass variations (Zenner et al. 2010). In addition, these observations were preprocessed such that they could be applied for global and regional gravity field determination with the energy integral method. For GOCE, a complete processing chain from accelerations to gravity gradients was implemented (Rummel et al. 2011a). In this way, alternative methods for processing, for example, the GOCE gravity gradients and the satellite orientation information could be developed, which are now incorporated into the official ESA Level 1B processing software (Stummer et al. 2011). The available software for detailed analysis and processing of raw data can be further used for various investigations, independently from the official ESA products. In particular, together with the gravity field modelling tools as described in Theme 4 below, a complete processing chain from the raw measurements to the resulting global gravity field is available for the GOCE mission. Finally, the theoretical fundament and software was developed to compute gravity gradients from satellite altimeter data (Bouman et al. 2011). Beyond satellite data, the use of terrestrial and airborne observations in a combined analysis with satellite information has been considered and the required preprocessing steps and corrections have been analysed in detail.

### **(4) Regional and global modelling**

Available observations of the Earth gravity field are usually described by a functional model, and the parameters of this model are estimated by least squares adjustment. For global models, spherical harmonic series are applied in most cases, while for regional methods wavelets are frequently chosen as base functions (Schmidt et al. 2006), or the collocation method is used (Pail et al. 2010b). All methods have in common that the parameter space is largely limited to gravity field quantities, while possible co-estimations of additional parameters are rarely included. A combined processing of geometric observations of the Earth surface together with gravity field measurements has been rarely applied so far. Further aspects, which are important for global analyses, are the choice of optimal base functions and the strongly increasing number of parameters when combining all available observation types. In the frame of the ESA project GOCE High-level Processing Facility (GOCE-HPF), the first global gravity field model solely based on GOCE data applying the “time-wise” method and the solution of a full normal equation system could be computed (Figure 7; Pail et al. 2011). Apart from that, also the worldwide first global, consistent combination models from GRACE and GOCE data were derived (GOCO; Pail et al. 2010a). Despite the progress made in computing techniques and numerics, the number of spherical harmonic coefficients determined with the most recent solutions is limited to degree and order 360, if one wants to make use of the full variance-covariance information. By using high performance computers and further developments of computing techniques, first combined test gravity field models up to degree and order 600 could be computed with full normal equations from satellite and terrestrial data. First attempts up to degree and order 720 were started, but fur

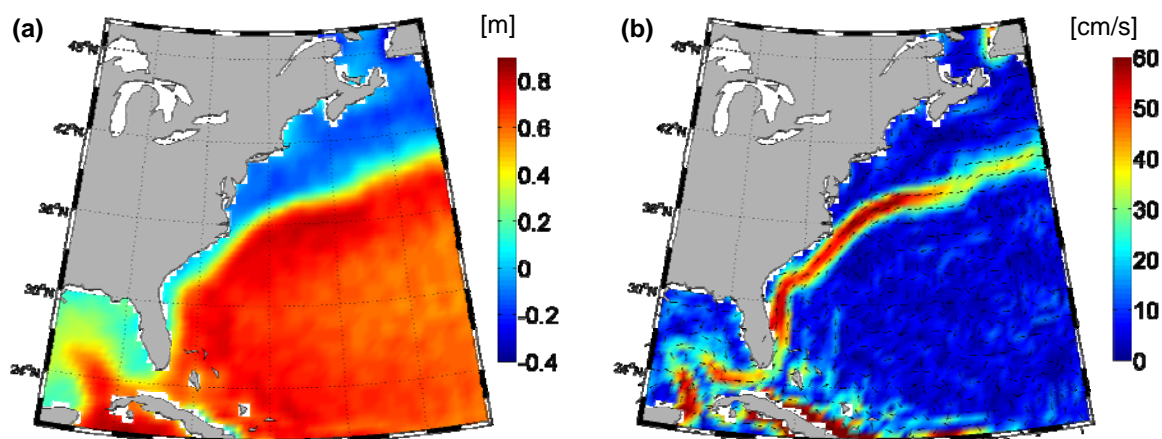


**Figure 7:** Geoid heights [m], computed from about 6 months of GOCE data.

ther optimisation of computing techniques is required. Important aspects for this work are the correct preparation of terrestrial and satellite altimeter data, the parametrisation of systematic effects in terrestrial data sets, and the relative weighting of the individual data sets during combination (Fecher 2008). Further on, the parametrisation of the time variable gravity field needs to be investigated. In current analyses linear trends or annual variations of selected gravity field coefficients are commonly estimated, which only partially reflects reality. For identifying the accuracy of the computed gravity field models, orbit fits and comparisons with independent observations (e.g. GPS levelling) are employed. In addition, derived geophysical signals are inspected for plausibility. It was found that for today's gravity field performances an independent validation is hardly possible (Gruber et al. 2011b).

## (5) Application strategies

From the combination of a global gravity field model and satellite altimetry one can derive the mean dynamic ocean topography (MDT) (Figure 8). This is possible with reasonable spatial resolution with the availability of data from the GRACE mission, but in particular with GOCE products (Bingham et al. 2011). One has to take into account that a gravity model and altimeter data have different spectral contents and therefore need to be consistently filtered (Albertella and Rummel, 2009). A global as well as a track-wise approach have been developed and inter-compared. Investigations are ongoing to make use of a-priori covariance information from gravity field and altimetry in the context of assimilation processes. Apart from that, investigations have been done in order to estimate a regional gravity field together with the MDT applying a regional approach with a dedicated parametrisation. To convert geometrical heights (e.g. from GNSS) into physical heights, the shape of the equipotential surface needs to be known in the terrestrial reference system. To determine and analyse the gravimetric and vertical reference frames, the geoid (quasi-geoid) was determined by a combination of geometric and gravimetric observations in a joint least squares solution. This reference frame should also enable the precise harmonisation of worldwide existing local height systems. The central task for this harmonisation is the determination of



**Figure 8:** Estimate of Mean Dynamic Topography (MDT) applying the combined GOCE-GRACE gravity field model GOCO02S (a) and derived geostrophic surface currents (b).

potential differences between the local reference levels and the global system. Corresponding methods to compute the potential differences as well as to estimate the impact of the global models have been developed and partially implemented. Gravity field data from, e.g., airborne gravimetry, terrestrial measurements, or GRACE have many applications for geophysical analyses and modelling. For example, the Sumatra (2004) and the Chile (2010) earthquake are visible in GRACE data. First investigations on the sensitivity of GOCE gravity gradients for large earthquakes (Chile 2010, Japan 2011) were started. In collaboration with geophysicists the impact of GOCE and GRACE data for the modelling of subduction zones and lithospheric processes as well as for the determination of the Antarctic ice mass balance is investigated (Rummel et al. 2011b). Finally, for the definition of future gravity field missions, an inventory of scientific requirements for the temporal and spatial resolution of the gravity field was prepared, in order to investigate the feasibility of such missions based on most realistic simulations.

## Programme and themes

### (1) Observation systems and sensor analysis

Apart from the classical Earth-based measurement techniques to observe the gravity field in a point-wise manner (levelling, terrestrial gravimetry, zenith cameras), satellite and airborne techniques, capable to provide information over large areas within short time, play a major role today. For these techniques, new sensors or sensor combinations are developed and used in many cases. Frequently, gravity field quantities are not the direct observable. Instead, derived quantities affected by the spatial and temporal gravity field variations are observed. As examples one can mention satellite orbits and satellite altimetry. In future, completely new sensor technologies, such as combinations of satellite missions and sensors or optical clocks, might be used as Earth gravity field observation systems.



For this theme the following tasks will be addressed:

- Characterisation of satellite-based gravity field sensors (signal and error behaviour, calibration of accelerometers and SST, satellite altimetry)
- Analysis of airborne gravity field observations (airborne gravimetry, inertial measurement unit) – see RA5
- Realisation of terrestrial gravimetric measurement campaigns (calibration, Alpine glaciers, hydrology)
- Budgeting of sensor and noise behaviour of future gravity field sensors (techniques for sensor analysis, concept studies)
- Analysis of satellite data time series for the determination of instrumental and satellite specific characteristics and for the investigation of interactions with the atmosphere

## **(2) Simulation processes**

The spatial and temporal resolution as well as the achievable accuracy of Earth gravity field modelling generally depend on the error characteristics of the sensors (see Theme 1 above) and on the spatial and temporal sampling of the sensor platform. Sensor characteristics and sampling also play an important role for the choice of the analysis concept to be applied (see also Theme 4 below). Therefore, realistic simulators are essential for the planning of future satellite gravity missions.

For this theme the following tasks will be addressed:

- Application and further development of the semi-analytical mission simulator (analysis of mission scenarios, extension of the simulator)
- Further development of the closed-loop mission simulator (analysis of different sensor characteristics, extension of the simulator for new observation types, implementation of parallel processing for higher efficiency, analysis of satellite information for reduction of temporal and spatial aliasing)
- Creation of a realistic simulation environment (related to orbit and gravity field) for SST missions and formations
- Simulation studies to make use of additional information for the determination of the static and time variable Earth gravity field (satellite altimetry, airborne and terrestrial sensors)

## **(3) Theory and measurement preprocessing**

Before gravity field observations can be used in a modelling approach, they have to be prepared and corrected in a consistent way. In order to convey the achieved measurement accuracies into the modelling results, the same accuracy level must be guaranteed for the preprocessing of the observations. In some cases this requires improvements in the fundamental theory as well as in the numerical implementation. In order to use different gravity field information such as from terrestrial or airborne measurements and from satellite altimetry in a joint modelling effort, they need to be characterised regarding their reference surfaces and their required corrections. A special focus is on the consistent processing of geometric and physical quantities describing the Earth system in order to use them in a later stage in a combined analysis. For the satellite methods, except for gradiometry, satellite orbits are the carrier of gravity field information. From observations of orbit perturbations by SST methods, linear functionals of the gravity field can be directly derived by applying specific approaches. In contrast, for gradiometry, point-wise gravity gradients are observed by a combination of several accelerometers and other sensors. In the case of GOCE, point-wise measurements are difficult to use due to their coloured noise. Methods are to be further

developed to filter the GOCE gradients and to improve those gradients by employing GRACE information in a collocation approach.

For this theme the following tasks will be addressed:

- Determination and application of altimetry-based gravity field information (gravity gradients derived from altimetry, impact of MDT, characterisation of available external data sets)
- Processing of raw measurements to gravity gradients (level 1B processing chain, pre-processing and analysis of GOCE gradients, alternative approaches)
- Supplementation of GOCE gradients with gravity gradients derived from global models and altimetry (gradients in different reference frames)
- Investigation of the sensitivity of individual tensor elements on the Earth gravity field
- Development and application of common standards for preprocessing of observations (for standards see RA4, systematic errors)

#### **(4) Regional and global modelling**

For modelling the regional, global and time variable Earth gravity field, a number of techniques and methods are available. The main difference between them lies in the base functions applied in the mathematical model. Here one has to distinguish between the regional and global approaches, i.e. it has to be investigated for which cases what method is most advantageous. An important strategic aspect in the modelling of time variable signals is the question what signal components to eliminate beforehand and what components to leave in the signal and how to parametrise them in the computational model. Another research topic is the computation of high resolution combined gravity field models. Apart from the preprocessing of terrestrial observations, the stochastic modelling and the optimal relative weighting are of great importance. Finally, the accuracies of the global and regional models have to be assessed by comparisons to independent observations. In this connection, the problem of comparability between spectrally limited signals and point-wise observations is fundamental.

For this theme the following tasks will be addressed:

- Further development and application of implemented approaches for global and regional gravity field modelling (semi-analytical, time-wise, multi-scale, least squares collocation, orbit perturbations)
- Investigations of alternative approaches and optimal stochastic modelling of GOCE gravity field modelling
- Investigations on methods to derive gravity field information from SST observations (integral approach, acceleration approach, energy balance approach)
- Investigations on how to deal with the time variable gravity field in gravity field analysis (correction by de-aliasing, parametrisation of time variable components)
- Investigation of systematic effects in the low-degree coefficients of gravity field models in their interplay with orbit determination, gravity field modelling, standards, and background models
- Joint processing of gravity field observations (global combination models, regional combination, parametrisation)
- Development of techniques for the setup and inversion of very large linear equation systems
- Further development of methods to identify the external accuracy of gravity field models and their application (validation)
- Development of a concept for joint modelling of geometry and gravity field (joint task with RA1 and RA4)

**(5) Application strategies**

For selected application fields, corresponding strategies for the usage of regional and global gravity field models are to be developed. Potential applications in the different Earth science disciplines are to be identified. These strategies will be developed in close collaboration with external partners and with RA3. The main focus of these tasks is to export gravity field expertise from CGE to the work of the external partners.

For this theme the following tasks will be addressed:

- Impact of improved gravity field information for the determination of the stationary component of ocean circulation (MDT) including consistent covariance propagation for describing the MDT errors
- Determination of a global height system
- Geophysical application of gravity field information for lithosphere modelling
- Application of gravity field information for ice sheets with inclusion of Cryosat-2 data
- Definition of requirements for future gravity field missions from an application perspective
- Combined use of geometric and gravimetric information (GNSS, SAR, altimetry) for the detection of deformations and mass signals with applications in hydrology, ice, ocean and solid Earth science (jointly with RA1 and RA3)



## Research Area 3: Geodetic Earth System Modelling

### Motivation and objectives

The general goal of RA3 is to improve the understanding of dynamical processes and their interactions within the Earth system, based on geodetic observations. A key element is the development and improvement of appropriate models, which describe the dynamic processes in the observed system components in a best possible way. The activities of this research area are highly interdisciplinary. Besides geodetic observational and model data, complementary data like observations and model results from neighbouring scientific disciplines (e.g. geophysics, meteorology, oceanography, hydrology, and glaciology) are involved. Following this concept, extensive information on dynamical processes in the Earth system will be obtained. This is of high importance, particularly for the research on global change. The results need to be made accessible to other scientific disciplines and to the public in order to provide a well-founded input for the current discussions on global change.

The globally oriented geometric and gravimetric observations treated by RA1 and RA2 extract fundamental and unique integral information on various balance quantities in the Earth system. In RA3, specific processes within the Earth system components and between single system components will be analysed in order to decompose the measured integral signals into the contributions from the single processes (separation of signals) in a best possible way, to assess the accuracy of individual process parameters and to close the balances as well as possible.

Essential research themes are the creation and, respectively, improvement of models in different parts of the Earth system, the determination of theoretical relationships between heterogeneous types of observations and model parameters, the analysis of numerical implementations including the validation of different estimation procedures with regard to their ability for model inversion as well as model prediction for processes at different time scales.

### State of the art and previous work

Using geometric and gravimetric measurements, geodesy determines the surface geometry, the gravity field and the Earth rotation (including the orientation in outer space) as well as other physical parameters of the Earth system (e.g. of the troposphere and the ionosphere). By the long history of observations and the increasingly precise geodetic space techniques, geodesy provides an excellent and (in contrast to many other geosciences) global data base for the determination of long-term changes in the Earth system. Geodetic observations are a fundamental contribution to understand long-term and large-scale processes and changes. Examples include changes of the surface geometry of the Earth's crust and of the oceans, changes of the sea ice and land ice cover as well as changes in the global water cycle and continental hydrology, evoked by environmental changes and anthropogenic influences.

For describing relations within the Earth system qualitatively and quantitatively, geodesy develops and uses mathematical (empirical) and physical (dynamical) models. Indeed, models are fundamental for the analysis of geodetic observations in terms of Earth system processes, since they define the relationship between measured quantities and physically interpretable parameters. In order to reduce unwanted signal components from observations and to decompose integral signals into their individual components, models from other geo-scientific disciplines are also involved. In turn, the geodetic high-precision observations on different spatial and temporal scales provide an important basis for assessing and improving the quality of models in neighbouring disciplines.

For many years, inverse methods have been developed in geodesy in order to set up empirical models for transport and exchange processes, in particular for mass transports within and between the Earth system components. Several studies investigated the inversion of GRACE gravity field solutions (Ramillien et al. 2005), of GPS-based crustal deformations, or of a combination of both data sources (Kusche and Schrama 2005) for mass redistributions, in particular of continental water and ice masses. High-precision ocean tide models from multi-mission altimetry (Savcenko and Bosch 2008) are another example for an inversion. Developments to use Earth rotation parameters (polar motion, length-of-day variations, UT1) in similar inversion approaches have been rare up to now. Most approaches for the geophysically interpreting observed Earth rotation variations are currently based on forward models, where angular momentum variations within, and exchanges between, the system components are described and budgeted (Gross et al. 2003).

As most of the geodetic parameter time series calculated and analysed at CGE have a large-scale or global character, the inferred information primarily concerns Earth system processes that occur at large spatial scales. Moreover, the section of the Earth system treated by CGE has a limited temporal and topical focus. The majority of current Earth system-oriented projects at CGE aims at modelling individual processes that have an immediate impact on certain geodetic parameters and therefore may be either directly observed or indirectly determined from combined heterogeneous observations from different techniques and modelling data. For the solid Earth, current work concerns modelling lithosphere dynamics with geometric space techniques (Drewes 2008), modelling load-induced surface deformations, tides and Earth rotation variations, as well as an improved determination of crustal elasticity parameters from the vertical deformation of globally distributed GPS stations. For the atmosphere, current work is focused on modelling tropospheric parameters and the ionospheric electron content and electron density (Krügel et al. 2007, Schmidt et al. 2008a). For the ocean, current work aims at determining the kinematics and the changes of sea level (Marcos et al. 2007), ocean currents and their temporal changes, oceanic mass variations and ocean tides, using combinations of altimetry and GRACE and GOCE satellite gravimetry as well as ocean models (Savcenko and Bosch 2008). Studies on the continental hydrosphere have covered the modelling of regional and global freshwater fluxes and water mass balances from gravity field variations and the separation of integral water storage variations into the contributions from individual storage components by multi-sensor approaches (Schmidt et al. 2008b, Seitz et al. 2008). For the cryosphere, the focus is on ice mass balances in polar regions (Horwath and Dietrich 2009, Rummel et al. 2011b).

In addition to monitoring and modelling individual processes and changes in the Earth system, complex dynamic Earth system models are developed at CGE, which consistently describe a multitude of processes within and between different system components (Seitz 2004). Processes of angular momentum, mass, and energy exchange are forward-modelled and subsequently budgeted against respective results from integral geodetic time series of Earth rotation parameters, gravity field coefficients and crustal deformations. Long-term forward-modelling simulations serve for predicting the future evolution of geodetic parameter time series (Seitz and Drewes

2009). By inverting an Earth system model, certain physical parameters of the Earth system that are not known precisely (e.g. Love numbers) are estimated from the geodetic parameter time series. In this context, the suitability of different estimation techniques is investigated extensively.

## Programme and themes

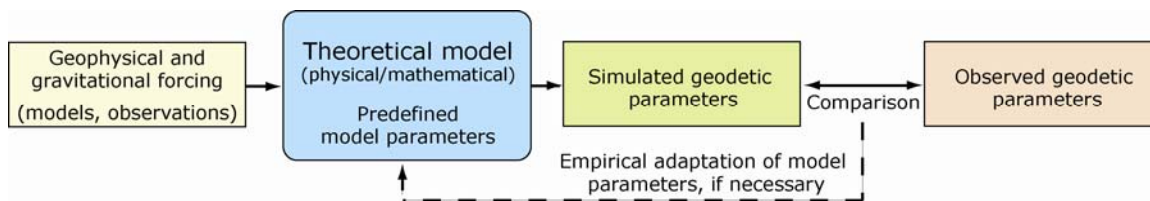
The programme of RA3 is oriented towards the following goals:

- (a) to reach an improved understanding of the dynamic processes within and between the Earth system components;
- (b) to use this understanding for describing the processes by models with best possible accuracy;
- (c) to predict long-term changes in the processes and related impacts on the environment;
- (d) to make the results accessible to other scientific disciplines and to the public in order to make a reliable contribution to the ongoing discussion on global change.

In addition to the parameter time series generated in RA1 and RA2, complementary observation and modelling data from other natural sciences and geosciences have to be incorporated in the frame of interdisciplinary collaborations. Conversely, the research results obtained at CGE will be fed back to those sciences in order to improve external models. For this aim, existing cooperations with other institutions of geodesy and of neighbouring disciplines have to be maintained and further developed, and new contacts have to be explored.

The objective is to model, in an application-oriented manner and as realistically as possible, those Earth system components that are most important for geodesy. By integrating heterogeneous observations and modelling results, dynamic processes and interactions within and between the individual system components will be studied, decomposed into sub-processes and described by theoretical and numerical models. Both forward models for predicting geodetic parameters and inverse models for estimating state parameters of the Earth system are to be developed and advanced. While inverse modelling aims at determining the dynamics of individual processes by incorporating as much of the relevant observational data as possible, forward modelling means to combine models for individual sub-processes into a comprehensive Earth system model. The latter enables to study the integral action of the subsystems and to compare it with the respective integral geodetic observations. Developing meaningful and reliable forward models is a basic requirement for predicting long-term natural and anthropogenic changes in the Earth system and their impacts on the environmental and living conditions, as targeted by CGE. By analysing geodetic observations in combination with results from neighbouring disciplines with regard to Earth system processes and their long-term changes, the activities of RA3 also make immediate contributions to GGOS.

In the forward modelling approach, the time series of observations serve as elements of balance equations which aim at describing the integral effect of mass and momentum exchanges in the Earth system with highest possible accuracy (Figure 9). In the effort for a better closure of these balances, the forward models need to be scrutinised for their consistency, and system components that have not been considered so far need to be added. For those components of angular momentum and mass variations that are not known sufficiently, their estimation from observations by inverse methods will be considered. After comparison with external data, the new estimates could be used to drive forward models. Sensitivity analyses have to be conducted to iden-

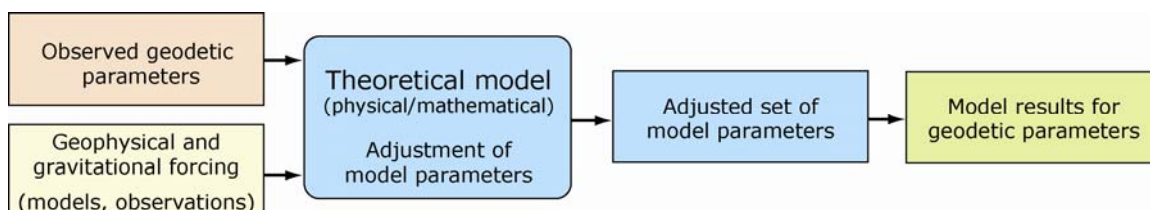


**Figure 9:** Schematic illustration of a forward model

tify critical model parameters that have large impact on the results but are insufficiently known. By suitable estimation procedures, estimates for such parameters have to be improved.

A main focus of RA3 is on inverse physical modelling (Figure 10). Parameters and state variables of the Earth system are to be determined from different observations (multi-sensor analysis) by adequate estimation procedures. Often, an appropriate combination of observations from different techniques enables to decompose the integral signals into their individual contributions. Interdisciplinary collaborations need to be strengthened for these inverse modelling activities. Not only have the contacts to external national and international partners be maintained and extended, but the CGE team itself should also become more interdisciplinary on a longer term. Research on the numerical implementation of models and algorithms and on the suitability of different estimation procedures for model inversions are other tasks in the context of inverse modelling, which are to be accomplished in close coordination with RA4. A great strength of geodesy lies in the assessment of observation quality and accuracy and in the propagation of measurement errors into the uncertainties of estimated parameters and state variables. With this background, inverse modelling comes along with reliable accuracy assessments for the calculated quantities. Comparisons between the geodetic results and existing numerical models for sub-systems (e.g. atmospheric, oceanographic, or hydrological models) allow to assess the model quality and to quantify the contribution from un-modelled system components to various balance magnitudes.

The results of RA3 will be directly fed back to the other CGE research areas. Particularly, improved models for the interpretation of geodetic observations are to be made available to RA1 and RA2 (e.g. for the modelling of the troposphere, ionosphere, load deformations, etc.). Based on the quality assessment of the results and on the budget between enhanced models for individual processes and the integral observations, gaps in the overall budget can be identified. On a longer term, deficits in the observation system should be identified and respective suggestions for additional or new sensors and missions should be developed in RA5.



**Figure 10:** Schematic illustration of an inverse model

Specifically the following research themes shall be addressed.

### **(1) Multi-sensor analyses**

The combined use of different space and in-situ observation techniques for investigating the Earth system is a main theme of RA3. A core topic is to describe how the static and time-variable parameters and state variables of the Earth system or its components affect the geodetic observations on different spatial and temporal scales. The Earth system parameters and state variables constitute unknown parameters in respective functional models (inverse modelling). The integrated analysis of observations from different techniques (multi-sensor analysis) also allows to decompose integral geodetic time series into contributions from individual processes. Multi-sensor analysis should compensate for weaknesses of individual sensors (e.g., insufficient sampling), increase the signal-to-noise ratio and overcome current limitations of modelling. The inverse modelling activities need to be embedded into stronger interdisciplinary cooperations than practiced today, and they should involve observation data from other geosciences. An essential goal of this research theme consists in an improved understanding of processes and interactions in the Earth system, which is of great importance in particular with regard to global change.

### **(2) Earth system models**

The geodetic time series of Earth rotation fluctuations and gravity field variations reflect important integral variables, which may be used for establishing balances (in particular of angular momentum and mass) that overarch the Earth system components. By physical Earth system models, the dynamic processes in and between the individual Earth system components are to be described and numerically simulated (forward modelling). In order to approach a best-possible closure of the balances, existing models and their input data (e.g. atmospheric mass distribution, mass transports, or pressure variations) have to be inspected for consistency and have to be complemented by system components that have not been sufficiently accounted for previously. Information on transport and exchange processes and interactions in different Earth system components should be also derived from the inversion of geodetic observations and other observation data, compared with external modelling and observation results, and incorporated into forward models. In addition, the mathematical algorithms, physical transfer functions and parameters contained in the physical models have to be inspected for their accuracy and their consistency, and have to be improved if needed. The intended prediction of parameters and processes by physical models also requires investigations on the predictive capability of those models (e.g., regarding the numerical stability of algorithms, the accuracy of initial conditions and driving processes, error propagation, etc.).

### **(3) Atmosphere**

The atmosphere can be subdivided into the neutral atmosphere and the ionosphere according to its electrical properties, where the troposphere forms part of the neutral atmosphere. Both layers influence the travel times of electromagnetic signals and have to be considered when analysing geodetic space observations. On the other hand, tropospheric and ionospheric parameters can be deduced from the combination of different space methods. This leads to improvements in atmospheric models. Such improvements not only aid the correction of geodetic measurements, but also provide valuable information to neighbouring disciplines like atmospheric physics and meteorology. Atmospheric models can be subdivided into physical, empirical, and mathematical models. While the former are based on basic physical equations, like, e.g., the Maxwell equation, empirical models simply use convenient

mathematical functions. The works focus on the development of mathematical-physical models, which incorporate, for example, physically motivated functions like the Chapman function into the description of vertical electron density profiles of the ionosphere.

#### **(4) Hydrosphere**

The hydrosphere can be subdivided into oceans and the continental hydrosphere. The work within this theme aims at a best possible monitoring of dynamic processes in these two Earth system components by geodetic observations and their comparison with models. Processes of mass and momentum exchange and transport are central aspects. For the ocean, the activities concentrate on determining the 4D field of surface currents, the sea surface geometry and kinematics at different temporal scales, different mass transport processes, and ocean tides. To this end, it is particularly essential to continue and further advance the activities concerning satellite altimetry. For continental hydrology, the focus is on the analysis of water storage variations and on their separation into single hydrological storage components with the goal to enhance existing hydrological models.

#### **(5) Cryosphere**

The cryosphere comprises Earth's ice-covered regions, in particular the large near-polar ice sheets of Greenland and Antarctica as well as glaciers and ice caps in Alaska, South America, the Himalaya, and elsewhere. The cryosphere has large influence on the global climate system, among other things through its capability to store water masses for long times or to serve as a buffer storage within the seasonal water cycle. In particular in mountainous regions with glaciers, the cryosphere plays an important role for human water and energy supply. Changes in the cryosphere, that is the growing or shrinking of ice sheets and glaciers, may be observed either by surveying the ice surface (e.g., terrestrial and airborne measurements, point-wise GNSS, satellite altimetry and remote sensing) or through the gravity field changes induced by mass redistributions (through terrestrial gravimetry on the local scale and satellite gravity missions on the large scale). Opportunities arising from the combination of complementary techniques, including new geometric sensors (e.g. CryoSat-2, TerraSAR-X), are to be thoroughly investigated. Cryospheric processes have direct links to other Earth system components, namely the solid Earth (loading effects and their feedback to the gravity field) and the hydrosphere (sea level rise, changes of ocean currents due to changes of fresh water in-fluxes). The challenge is to substantiate consistent results from different geometric and gravimetric techniques, aiming at a long-term monitoring of the cryosphere and at integrating the results into dynamical models.

#### **(6) Solid Earth**

Different fundamental physical parameters of the solid Earth (e.g. Love numbers, principal moments of inertia of the Earth mantle, orientation of the principal axes of inertia, free oscillations of the Earth) can be calculated from consistently estimated variations of Earth rotation parameters and the degree-2 gravity field coefficients by an inversion of the angular momentum equation. Oscillations of the Earth, for example, are induced by earthquakes. Their tangential components may be measured by a vertical pendulum. DGFI operates a 30-metre pendulum in the salt mine of Berchtesgaden. The time series related to Earth crust deformations obtained from the analysis of geometric observation techniques in RA1 are to be analysed with regard to elastic loading effects, tectonic processes, tidal effects and glacial isostatic adjustment processes.



## Research Area 4: Methodological Foundations

### Motivation and objectives

Research Area 4 (RA4) is meant to be a cross-sectional field of activity for the other research areas. By developing and providing methodological foundations and analysis methods, a comprehensive infrastructure has to be realised, which quickly leads to robust results and therefore allows for sound decisions in research and development. "Methodological foundations" is a focus that has not been treated so far as a self-contained research area in any of the participating research groups. Creating methodological foundations is by no means trivial and often requires new approaches, which are not immediately derived from project goals. Through the collaboration of several research groups from different institutions, tasks should be bundled to develop foundations, which can then be applied by all the research areas. Thereby the institutes will be more intensively linked with each other, duplication of work will be avoided, and the efficiency will be increased. These are long-term tasks, which can only be initiated in the present first CGE programme period.

In this research area it is necessary to develop a deeper understanding of precise measurements, to clarify their spatial and temporal resolution and to investigate the sensitivity of the observation methods for certain parameters of interest. Generic algorithms have to be developed, implemented in a numerically efficient way, tested, documented and managed. Particular interest is on methods for the combined analysis of different space techniques, for data analysis and synthesis by special functions, and for modelling of time dependent physical processes in the Earth system. It has to be checked whether the applied data are consistent, that is, whether they are based on the same model assumptions and basic conditions. The compilation, archiving and annotation of data have to be based on uniform principles and internationally recognised rules.

Also, due to the extremely high accuracies of the satellite based geodetic space techniques, the demands for analysis and evaluation are continuously increasing. The current analysis methods are to be reviewed, the validity of their assumptions is to be verified and tools have to be developed for identifying modelling deficits and deducing recommendations for an improved parameterisation. Simulations play a specific role and will help to develop optimal solutions for new measurement systems and methods of analysis.

RA4 will accept suggestions from the other research areas to develop new methodological foundations, or may by itself initiate developments that have applications of general interest. Projects mainly assigned to other research areas may define specific tasks for developing methodological foundations, which will be coordinated and handled by methods from RA4. New methods have to be sufficiently documented and their application in other areas has to be ensured by easy access, by sample solutions or solutions adapted to the specific needs of an actual project.

The development of methodological foundations and of new analysis procedures has to be based on uniform principles. Therefore rules have to be set up and are to be applied, e.g. for software design and versioning, its documentation and the associated test scenarios. In geosciences it is of particular importance to ensure the backup, documentation and long-term storage of primary data in order to provide the longest possible observational time series with respect to a reproducible geodetic reference frame for reliable findings in global change studies.

The appropriate use of data has to be ensured by defining and recording metadata. International standards have to be followed, and accepted rules of scientific practice have to be observed, e.g., the digital registration of data sets that serve as the basis of scientific publications (Alliance of German Science Organisations 2010). The open use of data, algorithms and programs creates security and facilitates their subsequent use. Data and results have to be made available to scientific users from other organisations, the public, and policy-makers.

In order to be able to compare scientific results it is necessary to observe specific standards and conventions. It should be reviewed whether these conventions are complete, correct and necessary. The consistency of the model data is to be investigated in order to avoid that differences in the model may mistakenly be interpreted as a geophysical signal.

## State of the art and previous work

A part of the natural sciences and engineering research consists in developing programs and program systems. For each problem in the various research areas it is necessary to realise appropriate programs or systems of programs for the analysis of the observation data, the sensor technology or the simulation of processes. In order to use these programs or program modules for years it is mandatory for the program code development to observe strict standards. Only the compliance with standards allows the reuse and sharing of modules. Therefore, a neat and clear style of programming code and an evident documentation are urgently needed. Different concepts are being developed by DGFI and the FESG in Wettzell to meet these standards and guidelines. These concepts aim at supporting the realisation of software standards by version control software (e.g., “subversion” SVN) and documentation generators (like “doxygen”). For the coding of programs a collection of guidelines is to be established (so called design rules), which ensure the standards for the project design, for generating code and executables, for test procedures and for documentation. Such design rules are already implemented by FESG at the GO Wettzell (Dassing et al. 2008).

Work on the implementation of methodological fundamentals has been done for instance in the development of the DOGS (DGFI Orbit and Geodetic Parameter Estimation Software) software (Gerstl, 1997, 1999). The software system strictly realises FORTRAN standards, uses general formulations and thus allows to solve a variety of linear equation systems with different parametrisations applying rigorous numerical methods. Similarly, IAPG maintains a collection of MATLAB tools used for the spherical harmonic analysis and synthesis, mainly for calculations of the gravity field.

Tasks in the context of modelling the gravity field, the ionosphere, the magnetic field and other global phenomena are often described using spherical harmonic series expansions. Due to the flattening of the Earth a significantly better approximation is expected by using ellipsoidal harmonic series expansions. First approaches to model the gravity field have already been conducted and evaluated at DGFI (Schmidt and Faber, 2008).

Simulators are an essential tool for analysing sensor systems or investigating processes. In the run-up to the satellite missions GRACE and GOCE a simulator was developed at IAPG to determine the sensitivity of the satellite systems with respect to certain geophysical signals (Oberndorfer and Müller 2002, Wermuth et al. 2006, Pail et al. 2007). In a similar manner simulations were carried out at IAPG and KEG with the satellite system Swarm, which is designed to observe the magnetic field of the Earth and to determine temporal gravity field variations based on the orbit determination for the three Swarm satellites (Wang, 2011).



Especially under the aspect of geodetic Earth system research it is essential to observe and combine geometric and gravitational signals in order to explain the entire system. Relevant approaches have been pursued in the GGOS-D project (Rothacher et al. 2011). The signals may well be misinterpreted if different standards are used for the analysis and evaluation. Hence, identical standards have to be considered in all geodetic and geophysical research areas. Such a standard are, for example, the IERS Conventions 2010 (Petit and Luzum 2010) established for studies of Earth's rotation and geodetic reference systems. Those standards must be reviewed and have to be updated in order to ensure completeness, actuality and consistency. For the inspection, supplementation and compliance of these standards the GGOS Bureau for Standards and Conventions has been established with participation of DGFI and IAPG/FESG staff members.

## Programme and Themes

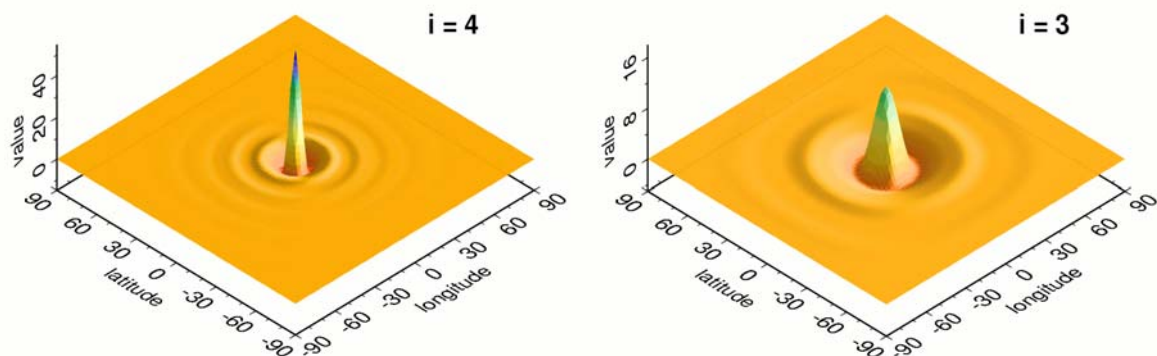
The following research themes are of essential attention within the RA4.

### **(1) Numerics, algorithm development, and parameter estimation**

In geodesy, parameter estimation often implies very large systems of equations with full or sparse matrices, matrices with band structures or special block-diagonal structures. For the solution, inversion, conditioning, datum definition and stability of such equation systems, appropriate methods have to be developed and provided. In doing so, direct and iterative solution strategies have to be considered, e.g., singular value decomposition, QR decomposition, conjugate gradients, or the Lanczos algorithm. Combining normal equations from various observation methods, the relative weighting needs to be objectified by variance component estimation. Procedures such as total least squares or the application of fuzzy logic are to be prepared. For computationally intensive tasks, such as for example the numerical integration of satellite orbits and the determination of high resolution gravity field models, the use of high performance computers and video cards, the parallelisation of programs, multi-processor and multi-threading strategies as well as concepts for designing distributed computer resources, like grid computing, are to be investigated. Algorithms for analysis and synthesis of high-order spherical and ellipsoidal harmonic series expansions are to be enhanced. Transformations between spherical and ellipsoidal harmonic series expansions are to be prepared, as well as various quadrature methods for the conversion of gridded fields into spherical harmonics. Also systems of functions with local support, such as spherical splines or wavelets, are to be investigated in detail in order to perform regional multi-resolution analyses (Figure 11).

### **(2) Computer Sciences**

The quality assurance of software can primarily be ensured by development and compliance of the standards for software engineering with obligatory rules for the code design, test procedures and for the versioning and documentation of analysis programs. Storage, description and preservation of data and models according to uniform principles facilitate software exchange and application. For this purpose metadata have to be defined and gathered. Results and data from the respective research areas should be provided to third parties by an appropriate infrastructure. International standards (e.g. ISO19115) have to be observed.



**Figure 11:** Representation of a spherical scaling function (Blackman function) as a regional basis function.

The establishment and maintenance of an internal knowledge database avoids duplication of efforts and accelerates the software development. As one of the first steps it is mandatory to inventory the existing software components and data stocks as a whole and if necessary to adapt them to the required standards.

### (3) Simulation of new sensor technology

Procedures for the analysis of new or previously unused observational techniques are to be developed. These include for example sensitivity analyses that indicate to what extent individual observation methods contribute to which target parameters. Possibilities for improving the signal-to-noise ratio must be investigated. It is necessary to clarify how the sampling rate of the observation techniques affects the evaluation of target parameters. The potential and error budget of new sensor systems are to be assessed and to be predicted through the development and application of simulators (Figure 12). For designing future satellite missions dedicated to geodetic problems, realistic simulators are essential. These include closed-loop mission simulators and the facility of a realistic simulation environment (in terms of orbit and gravity field, see RA2) for SST missions and formation flights of satellites. Examples of new or little-used observation techniques and sensors are new altimetry sensors with enhanced resolution and scanning capability (CryoSat-2, SWOT), imaging SAR (e.g. TerraSAR-X), including interferometric analysis, GNSS reflectometry, radiometry (SWOT) and buoys like Argo floats.

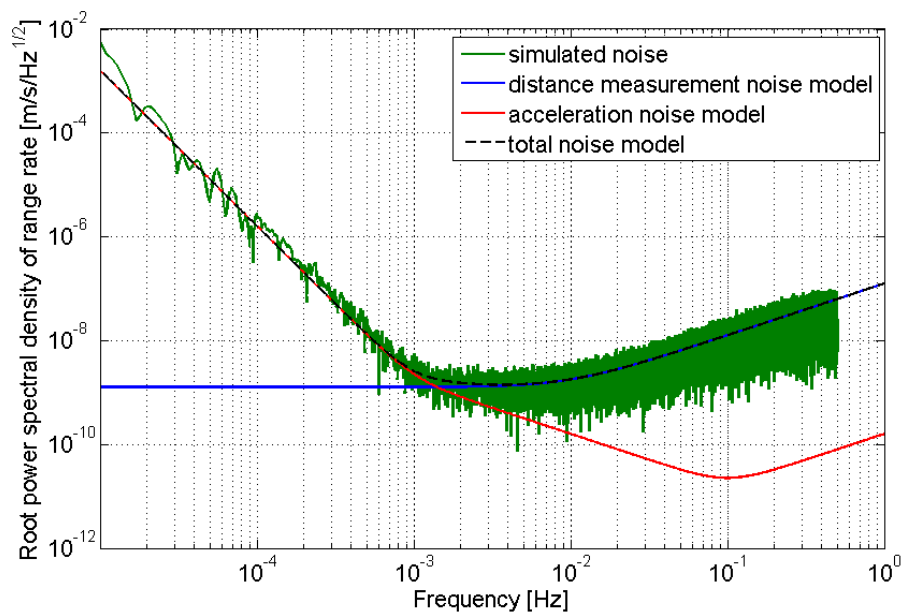
### (4) Standards and Conventions

Inconsistencies induced by the use of different constants, by different tidal systems and reduction models for atmospheric, hydrological, and relativistic effects have to be identified and their effects have to be evaluated. To avoid that such inconsistencies are misinterpreted as geophysical signals, values of the fundamental constants are to be recommended and specific rules for the application of geophysical models need to be established. Existing standards and conventions are to be evaluated, to be further developed and to be introduced into sets of geodetic rules.

### (5) Combination of complementary methods for the GGOS

Methodological foundations for the combination of geometric and gravimetric observations are to be developed with the long-term goal to derive a comprehensive set of parameters, by which the metric and weight of the Earth system can be described as completely and exactly as

possible. Among these parameters are, for example, coordinates, velocities of objects, Earth



**Figure 12:** Example for a simulation of a satellite mission with low-low satellite-to-satellite tracking. Blue and red: Specification for the error of the distance measurement and of the correction for non-gravitational accelerations, respectively. Black: Total error specification Green: Error spectrum of simulated observations for the gravitationally induced distance changes.

orientation parameters, static and time-dependent gravity field parameters, and quasar coordinates. The rigorous combination of all available observation methods corresponds to a consistent implementation of the GGOS principle.

## Research Area 5: New Technologies

### Motivation and objectives

The main tasks to support the geodetic long-time series are the observations themselves and according maintenance work. Apart from this, further engineering developments and technological research are of importance to design the new technologies for the future. These developments include the improvement of existing systems and the installation of completely new techniques. Recently, the classical geodetic techniques (SLR, VLBI, GNSS) have been supplemented by new developments of Sagnac interferometry on the basis of quantum optical systems. The application of atomic interferometry for the field of gravimetry, optical frequency combs and quantum optical frequency standards promises another important increase in the resolution of geodetic measurements. The direct link between technical data acquisition and data analysis as well as the involvement of other disciplines and services (e.g. timing services in the field of time and frequency infrastructure) are important in this context. These connections can be provided in the frame of CGE. Contacts and cooperations with institutes working on new technologies, such as PTB, QUEST and DLR, are here also very important. The new technologies are pioneering elements for the future GGOS stations and can be tested at the core station (fundamental stations), given by the Geodetic Observatory (GO) Wettzell.

### State of the art and previous work

The GO Wettzell with its unique instrumentation represents an excellently observed reference point and is involved in almost all international services of geodesy (with the exception of DORIS). The GO Wettzell is operated in collaboration between BKG and FESG in the frame of the Research Group for Satellite Geodesy (FGS). The contribution of FESG particularly consists in the further development of the observing systems and in the provision of staff for the operation, maintenance and development of the large instruments. Numerous further collaborations support these work with new research projects (Hydrology with GFZ, VLBI2010 with IGN Spain etc.).

The radio telescope Wettzell is integrated in the observing programme of the IVS. Operating about 3500 hours per year it has been the geodetic telescope of highest operation load for many years. Especially in the INTENSIVE campaigns for the determination of UT1-UTC, Wettzell is a key anchor point. Numerous real-time techniques (e-VLBI) are already used in order to deliver the products with minimal delays. In addition, the telescope frequently serves as a test station for new techniques, such as the Digital Baseband Converter or the Spacecraft Tracking to Mars, Venus Express and RadioAstron

The GO Wettzell also contributes to the ILRS by regular observations to almost all supported satellites. Travel times of laser pulses to artificial satellites and to the Moon, emitted from the ground station, are measured with an absolute accuracy equivalent to better than 1cm. Today's observations not only cover the pure geodetic SLR missions like LAGEOS, Stella and Etalon, which are used, among other things, for the determination of the ITRF and its long-term variations. They also support GNSS, altimetry and earth observation satellites as well as time transfer

and transponder missions (T2L2 and Lunar Reconnaissance Orbiter LRO). The Wettzell telescope is also involved in the orbit improvements of the LRO. In combination solutions, SLR provides the scale and the reference to the origin and thereby contributes to the improvement of orbit determinations for the satellite missions.

Moreover, the GO Wettzell operates of a GNSS network, which delivers its data in real-time to the according services (IGS and CONGO real-time network). Additional local systems at the GO Wettzell offer the time and frequency for the site, the determination of Earth rotation variations with ring lasers, gravimetry, seismology, meteorology and local surveying. Local surveying, in particular, is thoroughly and frequently done in Wettzell. In addition to these regular tasks, new technologies like rotational seismology are supported.

Concerning airborne gravimetry, a commercial strapdown inertial navigation system (SINS) is available within CGE. First experiments have been conducted with this system (Gerlach et al. 2010). Apart from this, a separate system has been developed for many years at BADW. Currently detailed investigations on the optimisation of the components of the entire realisation are performed, which serve as a basis for further experimental campaigns.

The works of Research Area 5 (RA5) are integrated into national and international cooperations and services. In addition to the list on page 7f, the following cooperations should be mentioned.

- NEXPreS (Novel EXplorations Pushing Robust e-VLBI Services)
- IVS Monitoring and Control Interface (MCI) Collaboration Group
- GGOS Working Group for Coordination, Communication and Automation.

Important cooperation partners, in addition to the FGS partners, are

- Max Planck Institute for Radio Astronomy Bonn
- Joint Institute for VLBI in Europe (Jive), The Netherlands
- University of Canterbury (UoC), Christchurch, New Zealand
- MIT Haystack Observatory, USA
- Geophysical Observatory of the LMU, Fürstfeldbruck
- Scripps Institution of Oceanography, USA

## Programme and themes

The contributions of the GO Wettzell is integrated into the international services and is conducted in the framework of FGS agreements. The close collaboration between the involved partners enables to cover a broad field of research and operation tasks. Therefore the goals of the present programme naturally overlap with the FGS research programme for 2011-2015. In this context, the cooperation of BKG and CGE at Wettzell is an essential advantage. The efforts within the CGE Research Area 5 is coordinated as tasks of the FGS research programme and supports it essentially.

### (1) Time and frequency

The role of time and frequency is nowadays fundamental for the (geometric) measurement techniques and will be further strengthened with the upcoming ultra-stable clocks in the future. On a long term, the pointwise observation of the gravity potential by ultra-stable oscillators might revolutionise the gravimetry. Therefore it is indispensable to follow the present developments of very stable oscillators and of time and frequency comparisons. Conse-

quently, the assessment of the applicable potential for the field of geodesy and the preparation of adequate tests are essential tasks at the GO Wettzell for the coming years.

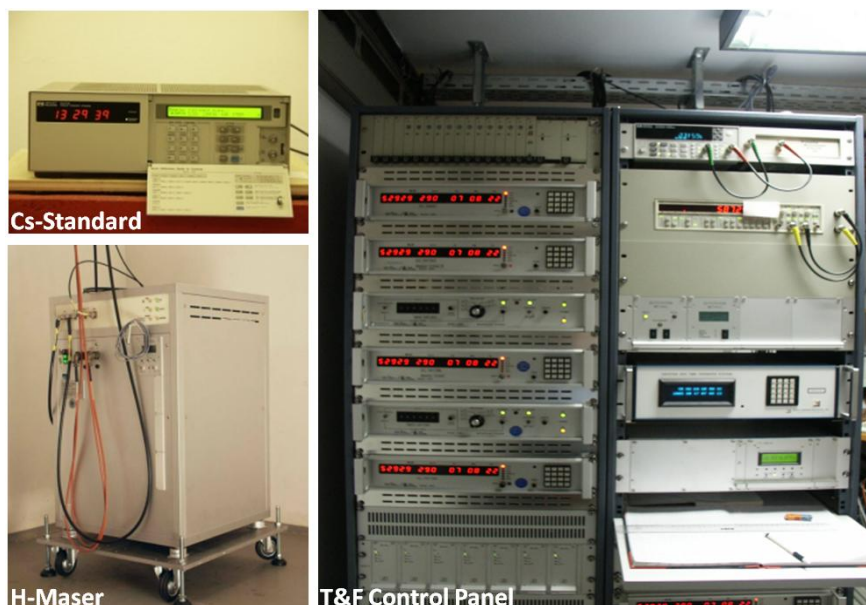
#### a) Time synchronisation with fibre optic techniques

The consistent connection of all measurement systems to a stable timing system at the observatory is a requirement for a consistent combination of the measurements on the observation level. This means the usage of identical clock parameters for different systems, such as VLBI and GNSS. Already today, new fibre-based and phase-stabilised transfer techniques allow transferring frequencies with an accuracy of  $10^{-18}$  over several hundred kilometres over one day. A comparable resolution is obtained for time, however only on distances of several hundred metres. Regarding the future requirements for time transfer and for the connection of measurement systems, e.g. the connection of the lasers to the timing systems, the integration of a frequency comb plays an essential role for the geodetic space techniques. Therefore, the connection of the observation systems in the observatory as well as the interlinking of time laboratories shall be investigated. The goal is to utilise time and frequency for geodesy as an excellently surveyed observable of space-time.

#### b) Improvement of short-time stability of the timing system

As VLBI is a one-way observation technique, it requires a time basis with short-term stability. While hydrogen masers are used today, the large ring laser “G” represents a resonator with Q factor  $< 10^{12}$  and may further enhance the short-time stability in the integration range of 1–1000 seconds by 1–2 orders of magnitude. A benefit for VLBI may be expected from longer coherence times for the correlation of the raw measurements, and should be pursued within the medium-term development of the GO Wettzell.

In addition, through its high resonator quality the optical resonator of the “G” ring laser is expected to fulfil the requirements for an improvement of the short-time stability of the caesium normal. For example, the PTB succeeded to connect an optical resonator of considerably lower resonator quality ( $Q \sim 50'000$ ) to the caesium primary standard CSF1 through an optical frequency comb. Using the “G”, the previous results of the PTB may be considerably improved without limiting the primary ring laser functions (i.e., the rotation observations).



**Figure 13:** The current time and frequency distribution in Wettzell is based on a number of H masers and Cs frequency standards, which are compared with a master clock.



## (2) VLBI

### a) Support of new VLBI2010 Technologies (TWIN Radio Telescope Wettzell)

Currently, two identical radio telescopes are set up at the GO Wettzell (TWIN concept, Neidhardt et al. 2010b), which are provided by BKG to realise the development goals of the VLBI2010 project group of the IVS (Niell et al. 2004). The realisation of this project not only requires instrument developments. In addition, new observation strategies have to be investigated to improve the internal stability of the system (new pointing and illumination tests as holographic reflector survey or zero-baseline observations; see also ideas in Lösler et al. 2010) and to bring the geodetic measurements closer to the GGOS objectives. Appropriate tests at the telescopes shall accompany the related investigations of the University of Bonn.

Principally, the TWIN and RTW telescopes can also be composed electronically to form a larger aperture. New observation opportunities arise in conjunction with the utilisation of an identical reference frequency (common clock) and the integration of a programmable phase shifter, to realise a frequency stabilised connection, which compensates travel times on the cables between the three telescopes. In this context, new observation schedules have to be developed and analysed. Additional opportunities arise from remote control techniques integrated for all radio telescopes. First realisations are currently under development at Wettzell. Co-operations for the development, like in the NEXPreS project (Novel EXplorations Pushing Robust e-VLBI Services), are being continued.

### b) Re-design of the calibration of system transfer times

Accompanying the frame of the timing system improvements at the GO Wettzell, a new design of the calibration facilities for the radio telescopes can also be realised. In particular, the phase calibration (Phascal) and the cable delay determination shall be investigated



**Figure 14:** The TWIN Radio Telescope Wettzell (TTW).

accordingly to the possibilities of optical frequency transfer (transfer oscillator) and ultra-short pulses (frequency comb) for an improved stability of the time reference for radio telescopes.

### **c) Use of the older telescope RTW**

When the TWIN telescopes will be fully operative, the main observation load will be handed over from the former RTW to the new system. For a dedicated time period, continuity of time series will still have to be assured by the RTW. In the long run, however, this telescope will also be available for future challenges. Its larger aperture and the corresponding higher system sensitivity make this telescope attractive for astronomical and astrometric measurements, such as investigations on source structures. The continuation of operability and, possibly, a conversion to new frequencies shall be investigated and realised. Such activities are also important for the observation of space probes and for the further development of the VLBI technology.

## **(3) SLR/LLR**

### **a) Transponder applications**

One-way range measurements by laser as well as optical transponder applications have emerged in the last years as new techniques for the satellite ranging. A number of preparatory simulation experiments were conducted in the frame of pilot studies within the FGS research programme for 2006-2010. In addition, the GO Wettzell has employed this technique for the support of LRO.

### **b) Time transfer (ACES)**

Another one-way application is in preparation for the Atomic Clock Experiment in Space (ACES) mission in the framework of the European Laser Time Transfer Project (ELT, 2013–2015). While for LRO, the main purpose of the observations is to determine the orbit for subsequent lunar gravity field modelling, ACES aims at a precise time transfer between the master clock in Wettzell and the near-earth orbiting PHARAO clock in space, with an accuracy of better than 50 ps. Owing to its time system optimised for geodetic observations, Wettzell has a special role within the ILRS, as demonstrated, for example, in the frame of the T2L2 project. The concept for time transfer to ACES was developed in Wettzell, Munich and Prague within a collaboration between EADS, TUM, and CTU funded by ESA in 2008/2009. The concept is now fixed for the mission. Due to the wavelength specification of 532 nm, the required observations must be made with the WLRS. FESG will establish the ELT data centre and operate this centre together with DGFI.

### **c) Two-colour laser**

Wettzell and Concepción (Chile) are presently unique for their two-colour laser systems. The related additional information content of the measurements has to be analysed regarding the benefit for modelling tropospheric effects. The inherent potential for improved tropospheric corrections should be fully exploited in conjunction with atmospheric information from other space techniques (VLBI, GNSS) and other sensors (water vapour radiometers). In Wettzell, opportunities of a four-colour measurement by simultaneous observations of both SLR systems as well as of a combination with the two microwave frequencies of the ACES terminal are to be explored.





**Figure 15:** Tracking stations of the CONGO Network. QZSS-capable stations are marked in red (Status of November 2011).

#### (4) GNSS

##### a) New satellite systems and signals

The establishment of the COoperative Network for GIOVE Observation (CONGO) was initiated by DLR and BKG in 2009 in order to globally capture the signals of the two Galileo In Orbit Validation Element (GIOVE) satellites. Since then, more institutions, like GFZ, have contributed GNSS stations to the CONGO network. The CONGO station at Wettzell operates its three different GIOVE-capable receivers with the same antenna and allows detailed investigations on the different signals. Based on the observation data of the global CONGO network, orbit and clock parameters of both GIOVE satellites as well as of the first satellite of the Japanese Quasi Zenith Satellite System (QZSS) are determined and analysed at IAPG. These analyses shall be extended to the Galileo In Orbit Validation (IOV) satellites and to the operational Galileo satellites, in order to study the new possibilities of this new GNSS (e.g., three frequencies, high-precision hydrogen maser).

##### b) Investigations on technical influences on the observations

With the ideal infrastructure of the GO Wettzell, technical influences on the GNSS recordings can also be investigated successfully. Multipath signal propagation, antenna and receiver characteristics in a real-world installation or problems with the connection to the local time and frequency structure can be tested on-site, following appropriate test scenarios. Embedding these activities in the general framework of geodetic analysis is essential and can be ensured within the CGE.

#### (5) Ring laser

##### a) Integration of the ring laser into the VLBI analysis

The continuous improvement of the ring laser observation accuracy allows the incorporation of future ring laser data into geodetic observation programmes and promises the emergence of new research disciplines (e.g., rotational seismics). A first step consists in the integration

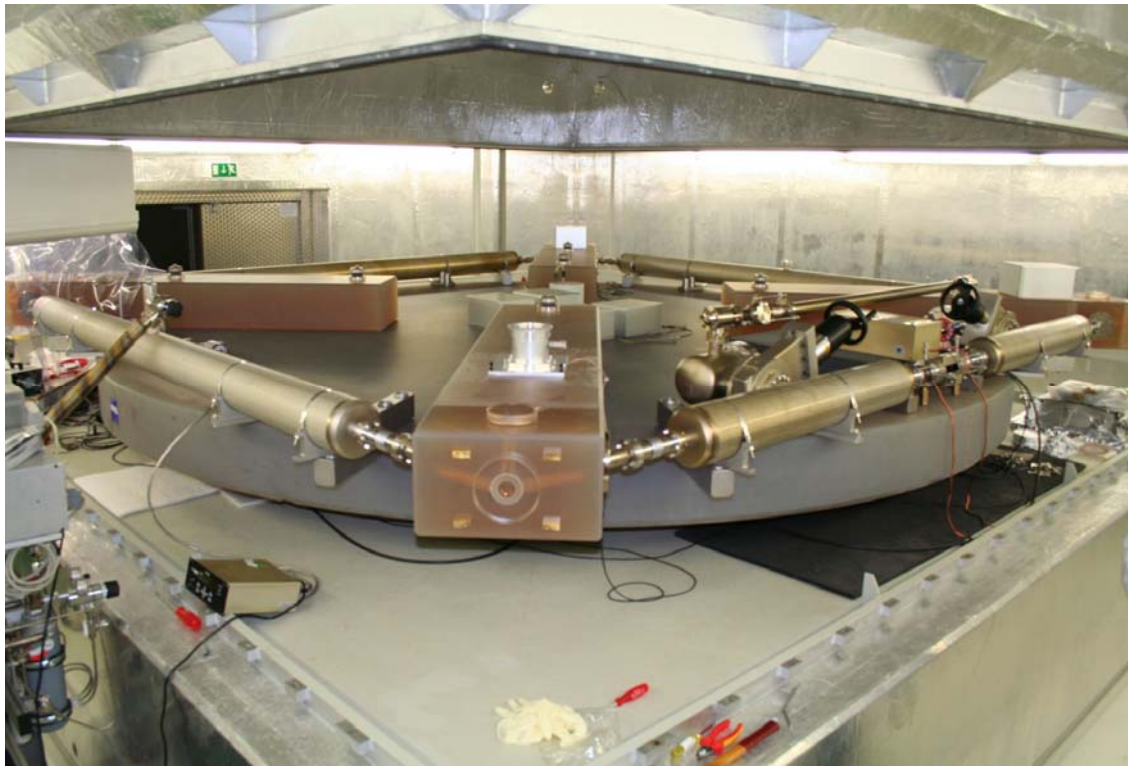
into the VLBI analysis. In the frame of the first (2005-2008) funding phase of the DFG Research unit “Earth Rotation”, ring laser observations were integrated into the VLBI analysis (Mendes Cerveira et al. 2009). Especially in the short-time range, the integration of ring laser measurements induces improvements of Earth rotation time series (Nilsson et al. 2011) and should be further developed towards a new operational product within CGE.

#### **b) Enhancement of ring laser performance**

Large ring lasers with a sensitivity of  $9 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$  resolve external rotations of  $\approx 10^{-7} \text{ rad s}^{-1}$ . With an integration time of 1800 s (0.5 hours), this sensitivity corresponds to a relative resolution capability ( $\Delta\Omega/\Omega$ ) of about  $10^{-9}$ . However, the time series of the Sagnac Frequency not only reflect variations of the global Earth rotation rate, but also local rotational components, micro-seismic tremor (with rotational components) and instrumental artifacts. Therefore, the principal task is to separate the individual sources of disturbing signals from the Earth rotation effects. Presently, the largest remaining systematic error of the “G” ring laser arises from the coupling of the two laser directions by backscattering. The development of an effective offline procedure to correct the respective errors will be of high priority in the years to come. Besides, environmental impacts on the ring laser are to be further investigated.

#### **c) Development of another large ring laser with more than one spatial component**

In the past two years, a collaboration between the ring laser group, the University of Pisa and the INFN has enabled the installation of a ring laser (GEOsensor design) for use at the Virgo gravity wave experiment (Lantz et al. 2009). Preparatory work for the development of a large ring laser system at Gran Sasso Massif, conducted in collaboration with INFN (Pisa), BKG, TUM (Wetzell) and UoC (Christchurch), are in an advanced stage. This project should therefore be further pursued.



**Figure 16:** The large ring laser “G” at GO Wetzell.

## **(6) Automation and remote control**

### **a) Control systems for a largely automatic operation**

While developing software for the new measurement systems in Wettzell, a control system for laser ranging (SLR2.0) was developed among other things. It builds the fundament for the automatic processing of SLR observations (Neidhardt et al. 2009). This control system complies with the modularity concept and with the general development and design rules of the observatory and shall autonomously execute all essential observation sequences in future. In addition, according to the upcoming operation of two SLR systems, LLR observations are re-integrated into the control system again. Similar software developments are under way for the VLBI systems (e-RemoteControl). In the coming years, these systems shall be extended and used for the distributed control of several remotely controllable radio telescopes (see VLBI2010 techniques). The overall goal is to establish a single integrated software system for an automatic and safe (remote) control of all large instruments at geodetic sites.

### **b) In-sky laser safety**

A high level of safety from laser radiation is in the centre of automation considerations in the field of laser ranging measurements. Safety in this field means the protection of human beings and of the system itself as well as eye safety for the participants of air traffic. Presently, the laser observations are supported by a radar system for airplane detection, but the pulsed system in Wettzell conflicts with the frequency bands of the VLBI2010 concept (see TWIN radio telescope). Furthermore, an optimised reduction of the laser intensity is required. With this background, possibilities for a sufficient in-sky laser safety shall be analysed and tested. In this context, the utilisation of secondary radio transponder systems of the airplanes can be further pushed as additional system. Alternative optical methods with eye safe lasers are also considered. Additional requirements arise from the ELT project, because ACES will fly with the ISS. The safety of the system is established by a separate system monitoring, which guarantees operational and functional safety with several parallel techniques. This system has to be further developed and adapted.

## **(7) General infrastructure and other technologies**

### **a) Network and information technology**

In times of increasing network traffic, the realisation of adequate structures for ensuring and optimising secure network communication becomes increasingly more important. In Wettzell, appropriate network enclaves for the individual measurement systems shall be created in cooperation with the operating subsystems. These enclaves constitute independent units, with access from outside, using secure keys for authentication and encryption. The enclaves reduce mutual influence of the different computers on time-critical measurement tasks. Another important step is to create the prerequisites for real-time services, such as e-VLBI or the connection to an external timing service by fibre optics. Protocols, data formats, storage techniques and procedures must be planned. Partly, they could be adopted from investigations on developments for astronomical data transfers such as for the Square Kilometre Array.

### **b) Meteorology and hydrology**

Numerous hydrological studies have been performed in the frame of several joint projects of the GO Wettzell and GFZ. Analyses of the time series from hydrological and meteorological sensors are particularly interesting in the context of gravimetric measurements and may help in improving the observation results. In the coming years, the potential of those additional measurements shall be further investigated. The further establishment of meteorological

sensors as well as the incorporation of other measurement techniques for the atmospheric water vapour content may provide additional parameters for this analysis.

#### **c) Integration of DORIS**

For the co-located integration of all present-day geodetic space techniques at GO Wettzell, the installation of the French DORIS systems should be re-considered. Investigations of the radio frequency interference with VLBI2010 need particular attention. Integrating DORIS at a location near the observatory would be of high geodetic interest to become a GGOS station, even though for DORIS itself, adding another beacon in Europe (already well covered by existing stations) is of secondary priority. Respective projects shall be planned and initiated.

#### **d) Gravimetry**

Airborne techniques for gathering gravity field information (airborne gravimetry, inertial measurement platforms) are to be further developed and tested (see RA2). Experiments with a commercial SINS conducted within CGE have demonstrated that the method and the instrumentation are principally suited for airborne gravimetry. Much more fundamental investigations have been performed for many years at the BAdW (Boedecker und Stürze 2006) for the development of a Strapdown Airborne Gravimetry System (SAGS), an inertial sensor platform especially designed for airborne gravimetry. The development is to be completed within the next two years, so that the platform will be ready for measurement campaigns. As compared to customary platform-stabilised systems, SAGS has the advantage to infer not only magnitude of gravity but the complete gravity vector. Another goal of the SAGS development is the increase of spatial resolution. Apart from airborne gravimetry, the development of novel, site-fixed sensor concepts, such as gravity determination through gravitational effects on optical clocks or quantum sensors, should be watched. Contacts and cooperations with research groups are to be established in order to further explore this field of research.

#### **e) SAR techniques**

Another field of work is opened by SAR radar remote sensing. New missions like TerraSAR-X and TanDEM-X enable Earth observation in unprecedented quality independent of daylight and of meteorological conditions. The GO Wettzell has supported related developments by the installation of a reference reflector for the calibration of TerraSAR-X/TanDEM-X on the ring laser mound. Within CGE, the consistent combination of areal geometric information from SAR and SAR interferometry with pointwise GNSS measurements as well as common influences like tropospheric delays should be investigated.

#### **f) Linking the measurement techniques through tropospheric influences**

Apart from the use of a common time reference and the high-precision survey of local ties, the fact that all space techniques at one site are subject to identical atmospheric conditions offers another opportunity to link the different space techniques. For this reason, considerations are to be made how to represent and to determine atmospheric conditions for this station by adequate measurement procedures and techniques.

## References

- Albertella A, Rummel R: On the spectral consistency of the altimetric ocean and geoid surface: a one-dimensional example. *Journal of Geodesy* 83(9), 805-815, doi: 10.1007/s00190-008-0299-5, 2009
- Alliance of German Science Organisations: Principles for the Handling of Research Data, <http://www.allianzinitiative.de/de/handlungsfelder/forschungsdaten/grundsaeetze/>, 2010
- Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L: ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy* 85(8), 457-473, doi: 10.1007/s00190-011-0444-4, 2011
- Angermann D, Drewes H, Gerstl M, Krügel M, Meisel B: DGFI combination methodology for ITRF2005 computation. In: Drewes, H. (Ed.): *Geodetic Reference Frames, IAG Symposia*, Vol. 134, 11-16, doi: 10.1007/978-3-642-00860-3, 2009
- Angermann D, Seitz M, Drewes H: Analysis of the DORIS Contributions to ITRF2008. *Advances in Space Research* 46(12), 1633-1647, doi:10.1016/j.asr.2010.07.018, 2010
- Bingham RJ, Knudsen P, Andersen O, Pail R: An initial estimate of the North Atlantic steady-state geostrophic circulation from GOCE. *Geophysical Research Letters* 38, L01606, doi: 10.1029/2010GL045633, 2011
- Boedecker G, Stürze A: SAGS4 - StrapDown Airborne Gravimetry System Analysis. In: Flury J, Rummel R, Reigber C, Rothacher M, Boedecker G, Schreiber U (eds.): *Observation of the Earth System from Space*, Springer, Berlin, S.463-478, 2006
- Bouman J, Bosch W, Sebera J: Assessment of systematic errors in the computation of gravity gradients from satellite altimeter data. *Marine Geodesy* 34(2), 85-107, doi: 10.1080/01490419.2010.518498, 2011
- Bouman J, Fiorot S, Fuchs M, Gruber T, Schrama E, Tscherning CC, Veicherts M, Visser P: GOCE gravitational gradients along the orbit. *Journal of Geodesy*, 85(11), 791-805, doi: 10.1007/s00190-011-0464-0, 2011
- Dassing R, Lauber P., Neidhardt A.: Design Rules für die strukturierte Programmierung unter C und die objektorientierte Programmierung unter C++. *Fundamentalstation Wetzell, Document 20040107DesignRulesCundCPP*, 2008
- Dettmering D, Bosch W: Global Calibration of Jason-2 by Multi-Mission Crossover Analysis. *Marine Geodesy*, 33(S1), 150-161, doi: 10.1080/01490419.2010.487779, 2010
- Drewes H: Update of the velocity field model for South America. *SIRGAS Boletín Informativo*, No. 13, 2008
- Ettl M, Neidhardt A, Mühlbauer M, Plötz C, Beaudoin C: The Wetzell system monitoring concept and first realizations. In: Behrend D, Baver KD (eds.) *VLBI2010: From Vision to Reality, IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864*, pp 444-448, NASA, Goddard Space Flight Center, 2010
- Fecher T: *Methodische Grundlagen von kombinierten Schwerefeldmodellen*. IAPG/FESG-Schriftenreihe 26, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, ISBN (Print) 978-3-934205-25-3, ISSN 1437-8280, 2008
- Forschungsgruppe Satellitengeodäsie: *Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2011-2015*. München, Frankfurt, Bonn, 2010
- Frommknecht B: *Integrated sensor analysis of the GRACE mission*. DGK, Reihe C, Heft 617, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, ISBN (Print) 3-7696-5056-5, ISSN 0065-5325, 2008
- Gerlach C, Dorobantu R, Ackermann C, Kjörsvik N, Boedecker G: Preliminary Results from an INS/GPS airborne gravimetry experiment over the German Alps. In: Mertikas SP (eds.) *Gravity, Geoid and Earth Observation, IAG Symposia*, Vol. 135, pp 3-10, Springer, doi: 10.1007/978-3-642-10634-7\_32, 2010
- Gerstl M: *Parameterschätzung in DOGS-OC*. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, DGFI internal report No. MG/01/1996/DGFI, München, 1997
- Gerstl M: *Mathematische Grundlagen für die Satellitenbahnbestimmung*. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München, 1999
- Gross RS, Fukumori I, Menemenlis D: Atmospheric and oceanic excitation of the Earth's wobbles during 1980–2000. *Journal of Geophysical Research* 108(B8), 2370, doi:10.1029/2002JB002143, 2003
- Gruber T, Bamber JL, Bierkens MFP, Dobslaw H, Murböck M, Thomas M, van Beek LPH, van Dam T, Vermeersen LLA, Visser P: *Simulation of the time-variable gravity field by means of coupled geophysical models*. *Earth System Science Data* 3(1), 19-35, Copernicus Publications, ISSN 1866-3591, doi: 10.5194/essd-3-19-2011, 2011a
- Gruber T, Visser P, Ackermann C, Hosse M: Validation of GOCE gravity field models by means of orbit residuals and geoid comparisons. *Journal of Geodesy*, 85(11), 845-860, doi: 10.1007/s00190-011-0486-7, 2011b



- Horwath M, Dietrich R: Signal and error in mass change inferences from GRACE: the case of Antarctica. *Geophysical Journal International* 177(3), 849-864, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04139.x, 2009
- Klügel T, Schreiber U, Schlüter W, Velikoseltsev A: Advances in inertial Earth rotation measurements – new data from the Wettzell G ring laser. *Proceedings Journées 2007*, 17-19 September, Paris, 173-176, 2008
- Krügel M, Thaller D, Tesmer V, Rothacher M, Angermann D, Schmid R: Tropospheric parameters: combination studies based on homogeneous VLBI and GPS data. *Journal of Geodesy* 81(6-8), 515-527, doi: 10.1007/s00190-006-0127-8, 2007
- Kusche J, Schrama E: Surface mass redistribution inversion from global GPS deformation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) gravity data, *Journal of Geophysical Research* 110, B09409, doi:10.1029/2004JB003556, 2005
- Lantz B, Schofield R, O'Reilly B, Clark D E, and DeBra D: Requirements for a Ground Rotation Sensor to Improve Advanced LIGO. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B), 980-989, doi: 10.1785/0120080199, 2009
- Lösler M, Eschelbach C, Schenk A, Neidhardt A: Permanentüberwachung des 20 m VLBI-Radioteleskops an der Fundamentalstation in Wettzell. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 135(1), 40-48, 2010
- Marcos M, Wöppelmann G, Bosch W, Savcenko R: Decadal sea level trends in the Bay of Biscay from tide gauges, GPS and TOPEX. *Journal of Marine Systems* 68(3-4), 529-536, doi: 10.1016/j.jmarsys.2007.02.006, 2007
- Mendes Cerveira PJ, Boehm J, Schuh H, Klügel T, Velikoseltsev A, Schreiber KU, Brzezinski A: Earth rotation observed by very long baseline interferometry and ring laser. *Pure and Applied Geophysics* 166(8-9), 1499-1517, doi: 10.1007/s00024-004-0487-z, 2009
- Molera Calvés G, Wagner J, Neidhardt A, Kronschnabl G, Pérez Ayúcar M, Cimó G, Pogrebenko S: First results of Venus Express spacecraft observations with Wettzell; in: Behrend D, Baver KD (eds.) *VLBI2010: From Vision to Reality*, IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864, pp 171-175, NASA, Goddard Space Flight Center, 2010
- Murböck M: Genauigkeitssimulation von Schwerefeld-Satellitenmissionen; IAPG/FESG-Schriftenreihe, Nr. 30, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, ISBN (Print) 978-3-934205-29-1, ISSN 1437-8280, 2011
- Neidhardt A, Ettl M, Lauber P, Leidig A, Dassing R, Mühlbauer M, Plötz C: New concepts in control systems for SLR with remotely accessible, autonomous process cells. In: Schillak S (eds.): *Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging, SLR – the Next Generation*, Vol. 2, pp 456-461, Space Research Centre, Polish Academy of Sciences, 2009
- Neidhardt A, Ettl M, Plötz C, Mühlbauer M, Hase H, Sobarzo Guzmán S, Herrera Ruztort C, Alef W, Rottmann H, Himwich E: Interacting with radio telescopes in real-time during VLBI sessions using e-control; *Proceedings of Science (PoS) – 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting: VLBI and the new generation of radio arrays*, Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA), 2010a
- Neidhardt A, Kronschnabl G, Klügel T, Hase H, Pausch K, Göldi W: The TWIN radio telescope project at Wettzell, Germany. *Proceedings of Science (PoS) – 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting: VLBI and the new generation of radio arrays*, Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA), 2010b
- Niell A, Whitney A, Petrachenko B, Schlüter W, Vandenberg N, Hase H, Koyama Y, Ma Ch, Schuh H, Tuccari G: *VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems*. IVS Memorandum 2006-008v01, 2004
- Nilsson T, Böhm J, Schuh H, Schreiber KU, Gebauer A, Klügel T: Combining VLBI and ringlaser observations for determination of high frequency Earth rotation variation. *Journal of Geodynamics*, submitted, 2011
- Nothnagel A, Angermann D, Börger K, Dietrich R, Drewes H, Görres B, Hugentobler U, Ihde J, Müller J, Oberst J, Pätzold M, Richter B, Rothacher M, Schreiber U, Schuh H, Soffel M: *Space-Time Reference Systems for Monitoring Global Change and for Precise Navigation*. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Volume 44, Frankfurt am Main, 2010
- Oberndorfer H, Müller J: GOCE closed-loop simulation; *Journal of Geodynamics*, 33(1-2), 53-63, doi: 10.1016/S0264-3707(01)00054-0, 2002
- Pail R, Metzler B, Preimesberger T, Goiginger H, Mayrhofer R, Höck E, Schuh W-D, Alkhatib H, Boxhammer C, Siemes C, Wermuth M: GOCE Schwerefeldprozessierung: Softwarearchitektur und Simulationsergebnisse. *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 132(1), 16-25, 2007

- Pail R, Goiginger H, Schuh W-D, Höck E, Brockmann JM, Fecher T, Gruber T, Mayer-Gürr T, Kusche J, Jäggi A, Rieser D: Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. *Geophysical Research Letters* 37, L20314, doi: 10.1029/2010GL044906, 2010a
- Pail R, Reguzzoni M, Sansó F, Kühnreiter N: On the combination of global and local data in collocation theory. *Studia Geophysica et Geodaetica* 54(2), 195-218, doi: 10.1007/s11200-010-0010-1, 2010b
- Pail R, Bruinsma S, Migliaccio F, Förste C, Goiginger H, Schuh WD, Höck E, Reguzzoni M, Brockmann JM, Abrikosov O, Veicherts M, Fecher T, Mayrhofer R, Krasbutter I, Sansó F, Tscherning CC: First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *Journal of Geodesy*, 85(11), 819-843, doi: 10.1007/s00190-011-0467-x, 2011
- Peterseim N, Schlicht A, Stummer C, Yi W: Impact of cross winds in polar regions on GOCE accelerometer and gradiometer data; in: Ouwehand L (Hrsg.): Proceedings of the 4th International GOCE User Workshop, ESA Publication SP-696, ESA/ESTEC, ISBN (Online) 978-92-9092-260-5, ISSN 1609-042X, 2011
- Petit G, Luzum B (Hrsg.): IERS Conventions 2010. IERS Technical Note 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2010
- Plag H-P, Pearlman M: Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Springer, Berlin, 2009
- Pritsch B, Schreiber KU, Velikoseltsev A, Wells J-PR: Scale Factor Corrections in Large Ring Lasers. *Applied Physics Letters* 91(6), 061115, doi:10.1063/1.2768639, 2007
- Ramillien G, Frappart F, Cazenave A, Güntner A: Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids. *Earth and Planetary Science Letters* 235(1-2), 283-301, doi: 10.1016/j.epsl.2005.04.005, 2005
- Rothacher M: Global Geodetic Observing System (GGOS): Status and Future. AOGS 5th Annual Meeting 2008, June 16-20, 2008, Busan, Korea, 2008
- Rothacher M, Angermann D, Artz T, Bosch W, Drewes H, Boeckmann S, Gerstl M, Kelm R, Koenig D, Koenig R, Meisel B, Mueller H, Nothnagel A, Panafidina N, Richter B, Rudenko S, Schwegmann W, Seitz M, Steigenberger P, Tesmer V, Thaller D: GGOS-D: homogeneous reprocessing and rigorous combination of space geodetic observations. *Journal of Geodesy*, 85(10), 679-705, doi: 10.1007/s00190-011-0475-x, 2011
- Rummel R, Yi W, Stummer C: GOCE gravitational gradiometry. *Journal of Geodesy*, 85(11), 777-790, doi: 10.1007/s00190-011-0500-0, 2011
- Rummel R, Horwath M, Yi W, Albertella A, Bosch W, Haagmans R: GOCE, satellite gravimetry and antarctic mass transports. *Surveys in Geophysics*, 32(4), 643-657, doi: 10.1007/s10712-011-9115-5, 2011b
- Sanchez L, Seemüller W: Report of the SIRGAS Analysis Centre at DGFI. SIRGAS 2010 General Meeting. www.sirgas.org, 2010
- Savcenko R, Bosch W: EOT08a – empirical ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. DGFI Report 81, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI), München, 2008
- Schmidt M, Han S-C, Kusche J, Sanchez L, Shum CK: Regional high-resolution spatio-temporal gravity modeling from GRACE data using spherical wavelets. *Geophysical Research Letters* 33, L08403, doi:10.1029/2005GL025509, 2006
- Schmidt M, Bilitza D, Shum CK, Zeilhofer C: Regional 4-D modeling of the ionospheric electron content. *Advances in Space Research*, 42(4), 782-790, doi: 10.1016/j.asr.2007.02.050, 2008a
- Schmidt M, Seitz F, Shum CK: Regional four-dimensional hydrological mass variations from GRACE, atmospheric flux convergence, and river gauge data. *Journal of Geophysical Research* 113, B10402, 2008b
- Schmidt M, Faber O: Ellipsoidal Wavelet Representation of the Gravity Field. Report 487, OSU, Columbus, Ohio, 2008.
- Schreiber KU, Klügel T, Stedman GE: Earth tide and tilt detection by a ring laser gyroscope. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2), doi: 10.1029/2001JB000569, 2003
- Schreiber KU, Velikoseltsev A, Rothacher M, Klügel T, Stedman GE, Wiltshire DL: Direct measurement of diurnal polar motion by ring laser gyroscopes. *Journal of Geophysical Research*, 109, B06405, doi: 10.1029/2003JB002803, 2004
- Schreiber KU, Wells J-P R, Stedman GE: Noise Processes in Large Ring Lasers. *General Relativity and Gravitation* 40(5), 935-943, doi: 10.1007/s10714-007-0584-2, 2008
- Seemüller W, Sanchez L, Seitz M, Drewes H: The position and velocity solution of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS (IGS RNAAC SIR). DGFI Report No. 86, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, 2010
- Seitz F: Atmosphärische und ozeanische Einflüsse auf die Rotation der Erde – Numerische Untersuchungen mit einem dynamischen Erdsystemmodell. Deutsche Geodätische Kommission, Vol. C 578, München, 2004

- Seitz F, Schmidt M, Shum CK: Signals of extreme weather conditions in Central Europe in GRACE 4-D hydrological mass variations. *Earth and Planetary Science Letters*, 268(1-2), 165-170, 2008
- Seitz F, Drewes H: Simulation of polar motion with a dynamic Earth system model over a period of 200 years (1860-2060). In: Soffel, H. (eds.) *Proceedings of the "Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2008"*, 2009
- Seitz M: Kombination geodätischer Raumberechnungsverfahren zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems. DGK Series C 630, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2009
- Seitz M, Angermann D, Bloßfeld M, Drewes H, Gerstl M: The DGFI Realization of the ITRS: DTRF2008, *Journal of Geodesy*, 86(12), 1097-1123, doi: 10.1007/s00190-012-0567-2, 2012
- Stedman GE, Hurst RB, Schreiber KU: On the Potential of Large Ring Lasers. *Optics Communications* 279(1), 124–129, doi: 10.1016/j.optcom.2007.07.011, 2007
- Steigenberger P, Rothacher M, Dietrich R, Fritsche M, Rülke A, Vey S: Reprocessing of a global GPS network. *Journal of Geophysical Research*, 111, B05402, doi:10.1029/2005JB003747, 2006
- Stummer C, Fecher T, Pail R: Alternative method for angular rate determination within the GOCE gradiometer processing. *Journal of Geodesy* 85(9), 585-596, doi: 10.1007/s00190-011-0461-3, 2011
- Tesmer V, Steigenberger P, Rothacher M, Boehm J, Meisel B: Annual deformation signals from homogeneously reprocessed VLBI and GPS height time series. *Journal of Geodesy* 83(10), 973-988, doi: 10.1007/s00190-009-0316-3, 2009
- Völksen C: EPN Reprocessing — a new EPN Project, *Proceedings of the EUREF Symposium*, 2009
- Wang X: Time-variable gravity field determination from satellite constellations, Swarm as an example; Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, TU München, 2011
- Wermuth M, Rummel R, Földváry L: Mission simulation and semi-analytical gravity field analysis for GOCE SGG and SST; in: Flury J, Rummel, R, Reigber C, Rothacher M, Boedecker G, Schreiber U (eds.) *Observation of the Earth System from Space*, pp 193-208, Springer, ISBN (Print) 978-3-540-29520-4, ISBN (Online) 978-3-540-29522-8, doi: 10.1007/3-540-29522-4\_14, 2006
- Zenner L, Gruber T, Jäggi A, Beutler G: Propagation of atmospheric model errors to gravity potential harmonics — impact on GRACE de-aliasing; *Geophysical Journal International* 182(2) 797-807, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04669.x, 2010



## List of abbreviations

ACES	Atomic Clock Experiment in Space
BAdW	Bavarian Academy of Sciences and Humanities (Bayerische Akademie der Wissenschaften), Munich
BKG	Federal Agency for Cartography and Geodesy (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie), Frankfurt am Main
BMBF	Federal Ministry for Education and Research (Bundesministerium für Bildung und Forschung), Berlin
CGE	Centre of Geodetic Earth System Research
CHAMP	Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical Research and Application
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CONGO	COoperative Network for GIOVE Observation
CryoSat	Cryosphere Satellite
CTU	Czech Technical University, Prague
DFG	German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft)
DGFI	German Geodetic Research Institute (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut), Munich
DGK	Deutsche Geodätische Kommission, Munich
DOGS	DGFI Orbit and Geodetic Parameter Estimation Software
DOGS-CS	DOGS Combination and Solution Software
DOGS-OC	DOGS Orbit Computation Software
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
EDC	EUROLAS Data Center, Munich
EGG-C	European GOCE Gravity Consortium
EGU	European Geosciences Union
ELT	European Laser Time Transfer Project
EOP	Earth Orientation Parameters
EOT	Empirical Ocean Tide model
EPN	EUREF Permanent Network
ESA	European Space Agency
EUREF	European Reference Frame
EUROLAS	Consortium of European Laser stations
e-VLBI	Electronic VLBI
FESG	Research Facility Satellite Geodesy (Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie), TU München
FGS	Research Group for Satellite Geodesy (Forschungsgruppe Satellitengeodäsie)
Galileo	European Satellite Navigation System
GFZ	Helmholtz Centre Potsdam/GFZ German Research Centre for Geosciences
GGOS	Global Geodetic Observing System (IAG)
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
GIPSY	GNSS-Inferred Positioning System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GO	Geodetic Observatory
GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
GOCO	Gravity Observation Combination
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HPF	High-level Processing Facility (GOCE)
IAG	International Association of Geodesy
IAPG	Institute of Astronomical and Physical Geodesy, TU München
IAS	International Altimetry Service
IAU	International Astronomical Union
ICESat	Ice, Cloud, and land Elevation Satellite

ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IDS	International DORIS Service
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGN	Institut Géographique National, France
IGN	Instituto Geográfico Nacional de España, Spain
IGS	International GNSS Service
ILRS	International Laser Ranging Service
INFN	Instituto Nazionale di Fisica Nucleare, Italy
InSAR	SAR Interferometrie
ISO	International Organization for Standardization
ISS	International Space Station
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IVS	International VLBI Service for Geodesy und Astrometry
KEG	Commission for Geodesy and Glaciology (Kommission für Erdmessung und Glaziologie) of the BAdW
LAGEOS	Laser Geodynamics Satellite
LLR	Lunar Laser Ranging
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München
LOD	Length Of Day
LRO	Lunar Reconnaissance Orbiters
MDT	Mean Dynamic Topography
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NASA	National Aeronautics and Space Administration, USA
OCCAM	VLBI analysis program
PHARAO	Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
QUEST	Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research, Hannover
QZSS	Quasi Zenith Satellite System
RA	Research Area
RNAAC-SIR	Regional Network Associate Analysis Center for SIRGAS
RNAAC-EUREF	Regional Network Associate Analysis Center for EUREF
RTW	Radio Telescope Wettzell
SAR	Synthetic Aperture Radar
SARAL	Satellite with Argos and AltiKa
SINS	Strapdown Inertial Navigation System
SIRGAS	Geocentric Reference System for the Americas (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas)
SLR	Satellite Laser Ranging
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity Satellite
SOS-W	Satellite Observing System Wettzell
SST	Satellite-to-Satellite Tracking
SVN	Apache Subversion
SWOT	Surface Water Ocean Topography Mission
T2L2	Time Transfer by Laser Link
TanDEM-X	TerraSAR-X-Add-on for Digital Elevation Measurements
TIGA	GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring
TRF	Terrestrial Reference Frame
TTW	TWIN Radio Telescope Wettzell
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
UoC	University of Canterbury, Christchurch, New Zealand
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WLRS	Wettzell Laser Ranging System





***Teil II***  
***Deutsche Version***

**Part II**  
**German Version**



# Inhalt

<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>Vision, Ziele und Programm</b> .....	<b>2</b>
Geodätische Erdsystemforschung .....	2
Die Vision .....	5
Die Vision .....	5
Allgemeine Ziele .....	5
Einbindung in Organisationen, Dienste und Kooperationen .....	7
Das Programm .....	9
<b>Forschungsbereich 1: Geometrische Verfahren</b> .....	<b>11</b>
Motivation und Zielsetzung .....	11
Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten .....	12
Programm und Themen .....	16
<b>Forschungsbereich 2: Schwerefeld</b> .....	<b>19</b>
Motivation und Zielsetzung .....	19
Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten .....	20
Programm und Themen .....	24
<b>Forschungsbereich 3: Geodätische Erdsystemmodellierung</b> .....	<b>27</b>
Motivation und Zielsetzung .....	27
Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten .....	27
Programm und Themen .....	29
<b>Forschungsbereich 4: Methodische Grundlagen</b> .....	<b>34</b>
Motivation und Zielsetzung .....	34
Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten .....	35
Programm und Themen .....	36
<b>Forschungsbereich 5: Neue Technologien</b> .....	<b>39</b>
Motivation und Zielsetzung .....	39
Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten .....	39
Programm und Themen .....	40
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>48</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>52</b>





## Einleitung

Das Centrum für Geodätische Erdsystemforschung (Centre of Geodetic Earth System Research), CGE, wurde mit der Unterzeichnung eines Kooperationsvertrags am 28. Oktober 2010 gegründet. Das CGE ist eine Kooperation

- des Instituts für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG) der Technischen Universität München,
- der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München,
- der Kommission für Erdmessung und Glaziologie (KEG), Abteilung Erdmessung, der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und
- des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI),

alle mit Sitz in München, auf dem Gebiet der geodätischen Erdsystemforschung.

Der Prozess zur Gründung des CGE geht auf eine Empfehlung des Wissenschaftsrates anlässlich einer Begutachtung des DGFI im Jahre 2005 zurück. Demnach sollte die Kooperation des DGFI mit der TU München intensiviert werden, was sich beispielsweise durch gemeinsame Berufungen erreichen ließe. Mit Blick auf die unübersichtlichen Strukturen der geodätischen Institutionen und ihre Verflechtungen am Standort München und darüber hinaus sollten auch Überlegungen zur Neuordnung der geodätischen Landschaft angestellt werden. In einer mehrjährigen Vorbereitungsphase wurde die inhaltliche und organisatorische Struktur einer entsprechenden Kooperation in Form des CGE festgelegt. Teil dieser Struktur sind fünf institutsübergreifende Forschungsbereiche (FB1—FB5).

Laut Kooperationsvertrag werden die Forschungsarbeiten im CGE in einem Forschungs- und Entwicklungsprogramm gemeinsam geplant und von einem Wissenschaftlichen Beirat in Abständen von maximal fünf Jahren begutachtet. Das vorliegende erste Forschungs- und Entwicklungsprogramm des CGE für die Jahre 2011 bis 2015 beschreibt Mission und allgemeine Aufgaben des CGE sowie Leitthemen und Aufgaben innerhalb der Forschungsbereiche.



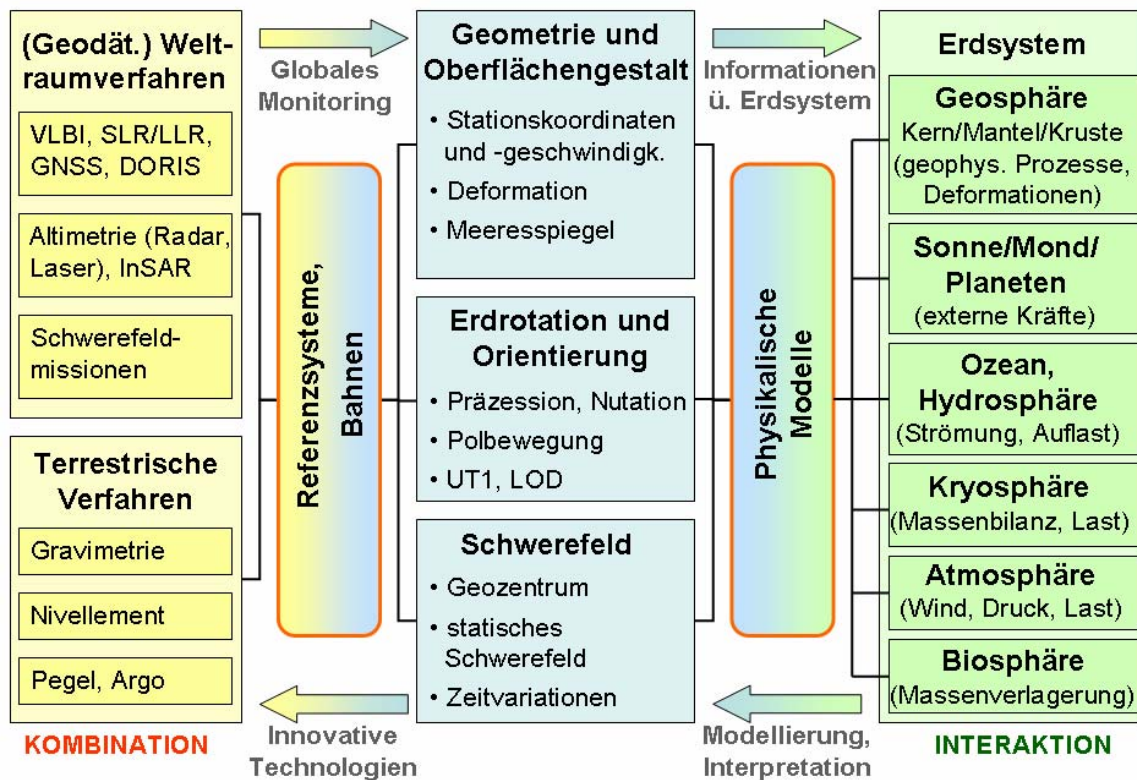
Die Erde ist ein ruheloser Planet. Atmosphäre, Ozeane, kontinentale Wassermassen, Eisbedeckung, Erdoberfläche und Erdinneres vollziehen eine Vielzahl dynamischer Prozesse in einer großen Spanne räumlicher und zeitlicher Skalen (Abbildung 1). Die wachsende Weltbevölkerung ist von den begrenzten Ressourcen dieses Planeten abhängig und ist seinen dynamischen Prozessen, etwa in Form von Naturkatastrophen, ausgeliefert. Gleichzeitig verändert die Menschheit das Erdsystem in wichtigen Komponenten einschließlich des Klimasystems, ohne es dabei ausreichend zu verstehen. Ein besseres Verständnis des Erdsystems und der Zusammenhänge zwischen dessen Komponenten wird dringend benötigt. Dies ist unerreichbar ohne Beobachtungen einer großen Palette von essentiellen Parametern, die das Erdsystem charakterisieren.

Die Geodäsie liefert, insbesondere durch moderne geodätische Raumverfahren und Satellitenmethoden, Parameter zu ihren drei Hauptfeldern:

- Geometrie der Erdoberfläche und ihre zeitlichen Änderungen,
- Schwerefeld und seine zeitlichen Änderungen,
- Rotation und Orientierung der Erde im Raum.

Die Geometrie von Punktnetzen und ihre zeitlichen Änderungen werden durch GNSS (Global Navigation Satellite Systems), SLR/LLR (Satellite Laser Ranging/Lunar Laser Ranging), VLBI (Very Long Baseline Interferometry) und DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) bestimmt. Erdrotationsparameter werden ebenfalls aus den genannten geometrischen Beobachtungsverfahren abgeleitet. Altimetrie vermisst die Geometrie von Ozean- und Eisoberflächen. Synthetic Aperture Radar (SAR) erlaubt die flächenhafte Bestimmung von Oberflächengeometrien und deren Deformationen. Satellitengravimetrie-Missionen wie GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) und GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ermöglichen die hochgenaue Bestimmung des Geoids als geophysikalische Bezugsfläche und die globale Bestimmung des zeitvariablen Schwerefeldes und damit ein direktes „Wiegen“ von Massenumverteilungen im Erdsystem. Aus der Wechselwirkung der elektromagnetischen Signale geodätischer Verfahren mit der Atmosphäre werden zudem wertvolle Atmosphärenparameter erschlossen.

Prozesse und Phänomene im Erdsystem schlagen sich in geodätischen Parametern nieder, und zwar im Allgemeinen in mehr als einem Feld der Geodäsie. Massentransportprozesse zwischen Eisschilden und Ozeanen beispielsweise bewirken Änderungen der Geometrie der Oberflächen der Eisschilde und der Ozeane sowie, durch Auflasteffekte, der festen Erde; sie verändern das Schwerefeld und, über Änderungen des Trägheitstensors, die Erdrotation. Die isolierte Betrachtung eines geodätischen Beobachtungstyps kann nur einen Teil des durch den Prozess induzierten geodätischen Signals erfassen und erlaubt es häufig nicht, dieses Signal von Signalen anderer geodynamischer Prozesse zu unterscheiden. Das Bestreben der geodätischen Erdsystemforschung ist es daher, durch Kombination aller relevanten geodätischen Beobachtungstechniken konsistente Sätze geodätischer Parameter für eine möglichst umfassende Beschreibung des Erdsystems zu bestimmen. Zur Definition solcher Parametersätze werden physikalische, mathematische und numerische Modelle verwendet, die die Phänomene und Prozesse in den Komponenten des Erdsystems, ihre Wechselwirkungen und ihre Effekte auf geodätische Messungen beschreiben („Geodätische Erdsystemmodellierung“). Notwendigerweise greifen solche Modelle auf Methoden und Daten anderer Disziplinen zurück und müssen mit diesen konsistent sein.



**Abbildung 2:** Wechselseitige Beziehungen zwischen den geodätischen Verfahren (links) und den Komponenten des Erdsystems (rechts) über die geodätischen Parametergruppen (Mitte) (nach Rothacher 2008, modifiziert).

Die Erschließung und Ausnutzung der engen Wechselbeziehungen zwischen geodätischem Messen und der Untersuchung von Erdsystemprozessen durch Nachbardisziplinen gehört somit zum Wesen der Geodätischen Erdsystemforschung (Abbildung 2). Geodätische Beobachtungen liefern Parametersätze und Zeitreihen für Oberflächengeometrie, Schwerefeld, Erdrotation und -orientierung. Diese tragen zu einem besseren Verständnis von Erdsystemprozessen bei, indem sie in entsprechende Modelle eingeführt werden. Umgekehrt erlauben verbesserte Modelle der dynamischen Prozesse im Erdsystem, die geodätischen Messungen besser zu interpretieren. Dies gibt wiederum Impulse für Innovationen bei den geodätischen Beobachtungstechniken, der Datenerfassung und -analyse, was zu genaueren und konsistenteren geodätischen Ergebnissen für die Erdsystemforschung führt.

Die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG) hat 2003 den Aufbau des Global Geodetic Observing Systems (GGOS) beschlossen (Plag und Pearlman 2009). Ziel ist die Integration der geodätischen Beobachtungen in einem einheitlichen globalen und langzeitstabilen Referenzsystem zur Erfassung geodätischer Parameter und deren zeitlicher Änderungen mit einer relativen Genauigkeit von mindestens  $10^{-9}$ . Damit soll der Beitrag der Geodäsie zum Verständnis und zur Erfassung des Erdsystems, insbesondere zum Verständnis des Globalen Wandels erbracht werden.

## Die Vision

Durch die Beobachtung der Figur der Erde, ihrer Orientierung und ihres Schwerefeldes, jeweils in Raum und Zeit, schafft die Geodäsie eine metrische Datenbasis für die Erdsystemforschung. Insbesondere durch moderne Raumverfahren werden der Meeresspiegelanstieg, das Schmelzen kontinentaler Eismassen, Veränderungen des kontinentalen Wasserkreislaufs und der Atmosphäre, Deformationen der festen Erde und viele andere Phänomene als globale Prozesse erkennbar und in ihrem räumlichen und zeitlichen Muster messbar.

Die Geodäsie wird dabei angetrieben vom dringenden gesellschaftlichen Bedarf nach einem Verständnis des Erdsystems und des Globalen Wandels wie auch nach zahlreichen praktischen Geodäsie-Anwendungen. Die Geodäsie profitiert von der rasanten Entwicklung geodätischer Weltraumverfahren und der elektronischen Datenverarbeitung. Sie profitiert darüber hinaus von einer rasanten Entwicklung der Zeitmessung, da die meisten geodätischen Messverfahren auf Laufzeitmessungen beruhen und sich mit hochgenauer Zeitmessung neue geodätische Anwendungen abzeichnen. Die Geodäsie bewegt sich damit im wahrsten Sinne des Wortes „am Puls von Raum und Zeit“.

Die Vision des CGE besteht in einem optimalen Beitrag der Geodäsie zu einer zuverlässigen und präzisen Beschreibung des Erdsystems. Diese Beschreibung umfasst den Zustand und die Prozesse des Erdsystems, einschließlich von Prozessen des Globalen Wandels und Prozessvorhersagen. Der Beitrag der Geodätischen Erdsystemforschung beruht auf einer vollen Ausschöpfung des Potenzials geodätischer Beobachtungstechniken durch ihre konsistente Kombination untereinander und ihre konsistente Verzahnung mit Modellen und Beobachtungen geowissenschaftlicher Nachbardisziplinen.

## Allgemeine Ziele

Durch das Zusammenführen der Forschungsaktivitäten von DGFI, IAPG, FESG und KEG (Abteilung Erdmessung) im CGE wird ein international neuartiges Zentrum geodätischer Forschung aufgebaut, das von wichtigen Synergien und neuen Möglichkeiten profitiert. Auf diese Weise soll das CGE durch exzellente Forschungs- und Entwicklungsarbeit und durch Mitarbeit in internationalen geodätischen Diensten maßgeblich zur Umsetzung der skizzierten Vision beitragen.

Dafür werden die folgenden allgemeinen Ziele verfolgt:

**Den gesamten Mess- und Auswerteprozess betrachten.** Mit der Ankopplung an das Geodätische Observatorium Wettzell und mit dem gemeinsamen Forschungsprogramm der an diesem Observatorium beteiligten Partner kann das CGE die gesamte Prozesskette von der Messung bis zur Modellierung und Interpretation bearbeiten. Aufgabe ist es, Forschung und Entwicklung für diesen Mess- und Auswerteprozess aktiv mitzugestalten, insbesondere unter Nutzung von Rückkopplungen zwischen Entwicklungen bei den einzelnen Prozessschritten.

**Neue Schwerefeldbeobachtungen.** Für die Vermessung des globalen Gravitationsfeldes wurden neuartige Ansätze der Satellitengravimetrie entwickelt, die nun mit Missionen erprobt werden. Damit ist ein neues Segment der Erdsystembeobachtung entstanden, das sensitiv bezüglich Massenverteilung und Massentransportprozessen ist. Diese neuen Technologien sind konsistent mit komplementären Datenquellen aus Altimetrie, SLR und terrestrischen Schwerefeldbeobachtungen zu kombinieren, um Modelle mit hoher räumlicher Auflösung zu erhalten. Ziel



ist, dieses Segment weiterzuentwickeln, sein Potenzial voll auszuschöpfen und Strategien für zukünftige Missionen zu entwickeln.

**GNSS und weitere Satellitenmissionen.** Die Navigationssysteme GPS, GLONASS und in Zukunft Galileo und Compass formen um die Erde kreisende und mit Atomuhren ausgestattete Polyeder. In Verbindung mit den dichten Netzen terrestrischer Empfänger entsteht ein Ortungs- und Navigationssystem mit sehr großem Anwendungsspektrum in Wissenschaft und Praxis. Die von den Satelliten ausgesandten elektromagnetischen Wellen sondieren gleichzeitig den Außenraum der Erde. Es entsteht eine echtzeitnahe tomographische Erfassung der Atmosphäre mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Zusätzlich sind mehrere Systeme von niedrig fliegenden Satelliten (Low Earth Orbiter) vorhanden bzw. geplant, mit denen die Schwerefeld- und Troposphärenforschung vorangebracht werden kann. Ziel ist es, die Möglichkeiten und Synergien dieser Techniken zu untersuchen, weiterzuentwickeln und zu nutzen.

**Terrestrische und flugzeuggestützte Validierung und Verdichtung.** Aus der Reife der geodätischen Weltraumverfahren erwächst eine wichtige neue Aufgabe für terrestrische und flugzeuggestützte geometrische und gravimetrische Messsysteme. Ihre Rolle für die Eichung und Validierung der Satellitensysteme, für die Interpolation und regionale Verdichtung wird in den kommenden Jahren signifikant zunehmen. Entsprechende methodische Untersuchungen und Anwendungen sind voranzutreiben.

**Weiterentwicklung der Theorie.** Der messende (d.h. experimentelle) und auswertende (analytische) Teil muss einhergehen mit einer entsprechenden Methodenentwicklung. Angesichts der schnellen Entwicklung geodätischer Messverfahren sind die theoretischen Grundlagen umfassend neu zu formulieren. Hier ist eine sehr große Aufgabe in der geodätischen Theorie zu leisten, ohne die die technologischen Möglichkeiten zukünftiger Vermessungssysteme nicht umsetzbar sind.

**Bereitstellung von Datenprodukten.** Als Ergebnis der Auswertung geometrischer und gravimetrischer Beobachtungsdaten sind hochgenaue Datenprodukte (wie globale und regionale Referenzsysteme, globale und regionale Schwerefeldmodelle) zuverlässig bereitzustellen, die sich an den Bedürfnissen der internationalen Wissenschafts- und Nutzergemeinschaft orientieren. Das CGE soll damit auch weiterhin wesentlich zu wissenschaftlichen Diensten der IAG beitragen.

**Konsistente Kombination.** Ziel der Forschung ist es, die drei Felder der Geodäsie, d.h. die Geometrie der Erdoberfläche, das Rotationsverhalten des Erdkörpers und das Gravitationsfeld, mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern in einem konsistenten, langzeitstabilen Referenzsystem zu vermessen. Durch die konsistente Kombination komplementärer geometrischer und gravimetrischer Informationen sollen Deformations- und Massensignale detektiert und gemeinsam interpretiert werden.

**GGOS.** Die internationale Geodäsie hat sich 2003 mit dem Aufbau des GGOS eine für die Fragen des Globalen Wandels und damit für die Daseinsvorsorge bedeutende Zukunftsaufgabe gestellt. Die Mitglieder des CGE haben dieses Konzept mitinitiiert und mitgestaltet und sich zu zentralen Aufgaben in den wissenschaftlichen Diensten verpflichtet. Gleichzeitig sind Mitglieder des CGE aktiv in die Organisationsstrukturen von IAG und GGOS eingebunden. Im Rahmen des CGE sollen diese Aufgaben umfassend und im Einklang mit den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Zielen von GGOS bearbeitet werden. Gleichzeitig entsteht eine wichtige Rückkopplung für die Ausbildung zukünftiger Geodäten.

**Entwicklung neuer Technologien, Zeitmessung,  $10^{-10}$ -Geodäsie.** Die Entwicklung der Zeitmessung auf dem relativen Genauigkeitsniveau von  $10^{-18}$  lässt für die Zukunft eine Erdmessung auf einem relativen Genauigkeitsniveau von  $10^{-10}$  – also nochmals erheblich genauer als die GGOS-Spezifikation von  $10^{-9}$  – als realistisch erscheinen. Dies birgt neue Möglichkeiten für die Erforschung des Erdsystems von der Atmosphärenphysik bis zur Physik der festen Erde und der Erfor-



schung der Planeten. Forschung und Entwicklung zur Ausnutzung dieser Möglichkeiten sind voranzutreiben.

**Bezug zum Erdsystem, Verzahnung mit Nachbarwissenschaften.** Geodätische Theorien, Methoden und Modelle müssen sich konsistent in Erdsystemmodelle einbringen lassen. Daher ist ein interdisziplinärer Zugang in enger Kooperation mit anderen geowissenschaftlichen Disziplinen unumgänglich. Die geodätische Erdsystemforschung bringt die Messung und Quantifizierung von Zuständen und Veränderungsprozessen des Erdsystems in die geophysikalische Modellbildung des Erdsystems ein und unterstützt deren Interpretation. Gleichzeitig nützt sie im Zuge ihrer Auswerte- und Prozessierungsketten in vielfacher Weise verbesserte Modelle von Komponenten des Erdsystems.

**Außenwirkung und Veröffentlichungen.** Die gewonnenen Daten und Ergebnisse müssen in geeigneter Weise wissenschaftlichen Nutzern anderer Disziplinen, der Öffentlichkeit und politischen Entscheidungsträgern zur Verfügung gestellt werden. Nur so kann ein wirksamer Beitrag auch zur aktuellen Diskussion zum Globalen Wandel geleistet und die Bedeutung der Geodäsie für diese Diskussion nachhaltig vermittelt werden.

**Anwendungen.** Technologische Entwicklungen, von denen die geodätische Forschung profitiert, eröffnen auch neue Horizonte für praktische Anwendungen, wie z.B. hochpräzise Navigation und Ortung, Verkehrssysteme, Landesvermessung und Geoinformation, Globale Dateninfrastruktur, Datenübertragung und Kommunikation. Von entsprechenden Synergien für praktische Anwendungen soll Gebrauch gemacht werden.

## Einbindung in Organisationen, Dienste und Kooperationen

Das CGE liefert wichtige Beiträge in den Kommissionen und wissenschaftlichen Diensten der IAG und in anderen internationalen Verbundprojekten. Forschungserkenntnisse fließen direkt in die Arbeiten der Dienste ein, und Ergebnisse aus den Produkten der Dienste geben Rückschlüsse für weiteren Forschungsbedarf. Im Einzelnen sind folgende Aktivitäten hervorzuheben.

### IAG (International Association of Geodesy)

- Sub-Commission 2.3: Satellite Gravity Mapping Missions: Präsident
- Commission 4 Study Group SG 4.2: Ionosphere Modeling and Analysis: Chair
- Inter-Commission Study Group IC-SG11: Methodology of regional gravity field modeling: Chair
- Inter-Commission Study Group IC-SG13: Multi-sensor combination for the separation of integral geodetic signals: Chair

### GGOS (Global Geodetic Observing System)

- Bureau for Standards and Conventions: Chair
- Working Group for Satellite Missions: Co-Chair

### IERS (International Earth Rotation and Reference System Service)

- ITRS-Kombinationszentrum

### IGS (International GNSS Service)

- Vorsitz (IGS-Chair)
- Betrieb von GNSS-Stationen
- Beteiligung am CODE IGS-Analysezentrum (Reprocessing)

- Regionales Analysezentrum für Europa (RNAAC-EUREF)
- Regionales Analysezentrum für Lateinamerika (RNAAC-SIR)
- GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring (TIGA): Analysezentrum
- Antenna Working Group: Chair

#### **ILRS (International Laser Ranging Service)**

- Betrieb von SLR-Stationen (gemeinsam mit Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, BKG)
- Daten- und Operationszentrum (EDC)
- Analysezentrum

#### **IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)**

- Betrieb von VLBI-Stationen (gemeinsam mit BKG)
- Analysezentrum
- Kombinationszentrum (gemeinsam mit BKG)

#### **IAS (International Altimetry Service)**

- Vorsitz beim Aufbau

#### **IAU (International Astronomical Union)**

- Commission 19: Rotation of the Earth: Sekretariat

#### **EGU (European Geosciences Union)**

- Division on Geodesy: Vize-Präsident

#### **European GOCE Gravity Consortium (EGG-C)**

- Leitung

Arbeiten der FESG, des IAPG und des DGFI sind eingebunden in das Programm der **Forschungsgruppe Satellitengeodäsie** (FGS), gemeinsam mit dem BKG und dem Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Universität Bonn. Damit haben die hier dargestellten Zielsetzungen Überschneidungen mit dem Forschungsprogramm der FGS 2011–2015. Weitere Kooperationen werden in den nachfolgenden Darstellungen der Forschungsbereiche genannt.

## Das Programm

Das Programm des CGE wird in fünf Forschungsbereiche unterteilt:

### 1 Geometrische Verfahren mit den Themen

- (1) Messsysteme, Datengewinnung und -bereitstellung
- (2) Modellentwicklung und Analyse der geometrischen Raubeobachtungsverfahren
- (3) Analyse und Weiterentwicklung der Kombinationsverfahren
- (4) Berechnung konsistenter globaler und regionaler Referenzrahmen
- (5) Anwendungsstrategien

### 2 Schwerefeld mit den Themen

- (1) Beobachtungssysteme und Sensoranalyse
- (2) Simulationsprozesse
- (3) Theorie und Aufbereitung der Beobachtungen
- (4) Regionale und globale Modellbildung
- (5) Anwendungsstrategien

### 3 Geodätische Erdsystemmodellierung mit den Themen

- (1) Multi-Sensor-Analysen
- (2) Erdsystemmodelle
- (3) Atmosphäre
- (4) Hydrosphäre
- (5) Kryosphäre
- (6) Feste Erde

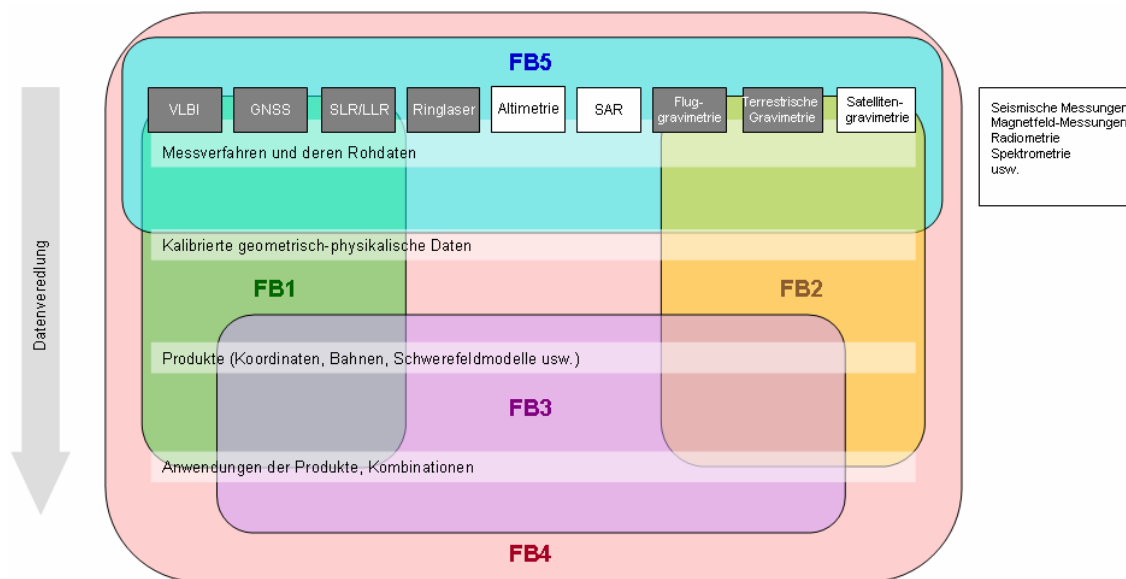
### 4 Methodische Grundlagen mit den Themen

- (1) Numerik, Algorithmenentwicklung und Parameterschätzung
- (2) Informatik
- (3) Simulation neuer Sensorik
- (4) Standards und Konventionen
- (5) Kombination komplementärer Verfahren für das GGOS

### 5 Neue Technologien mit den Themen

- (1) Zeit und Frequenz
- (2) VLBI
- (3) SLR/LLR
- (4) GNSS
- (5) Ringlaser
- (6) Automatisierung und Fernsteuerung
- (7) Allgemeine Infrastruktur und weitere Technologien

Jeder Forschungsbereich umfasst Themen, für die eine gemeinsame institutsübergreifende Koordination erfolgen soll. Dabei kann keiner der Forschungsbereiche isoliert arbeiten, sondern auch zwischen den Forschungsbereichen sind zahlreiche Verknüpfungen für die Verfolgung der allgemeinen Ziele des CGE offensichtlich notwendig. Einige Forschungs- und Entwicklungsaufgaben und -projekte berühren schon an sich mehr als ein Thema und bedürfen daher der Koordination durch mehr als einen Forschungsbereich. Abbildung 3 illustriert Abgrenzungen und Verknüpfungen zwischen den Forschungsbereichen anhand einer Zuordnung zu Stufen der geodätischen Datengewinnung und -analyse.



**Abbildung 3:** Schematische Zuordnung der Forschungsbereiche zu Stufen der geodätischen Datengewinnung und -analyse. Die vertikale Gliederung (siehe Pfeil links) entspricht den unterschiedlichen Stufen. Messverfahren (oben) liefern zunächst Rohdaten (z.B. Laufzeiten, elektrische Spannungen). Grau unterlegt sind Messverfahren, die im CGE selbst betrieben werden. Weitere Bearbeitungsstufen bringen kalibrierte geometrisch-physikalische Daten, Produkte (wie Koordinaten, Bahnen, Schwerefelder, usw.) sowie Anwendungen der Produkte und Kombinationen hervor. Die farbigen Kästen illustrieren die Zuordnung der Forschungsbereiche zu den Bearbeitungsschritten.

# Forschungsbereich 1: Geometrische Verfahren

## Motivation und Zielsetzung

Die Arbeiten im Forschungsbereich 1 (FB1) stützen sich auf die geodätischen Weltraumbeobachtungsverfahren wie Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite and Lunar Laser Ranging (SLR/LLR), Global Navigation Satellite Systems (GNSS) mit den Mikrowellenverfahren GPS, GLONASS und zukünftig Galileo und Compass, Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) sowie Satellitenaltimetrie. Diese Beobachtungsverfahren erlauben heute eine hochgenaue und kontinuierliche geometrische Ausmessung der Erdoberfläche sowie ihrer zeitlichen Variationen. Damit kann die Geodäsie kleinste Änderungen in Raum und Zeit quantitativ erfassen, z.B. als Indikatoren des langsam verlaufenden Globalen Wandels oder für echtzeitnahe Warnsysteme vor Naturgefahren. Als wichtige Grundlage dafür sind höchste Genauigkeiten für die gesamte Verarbeitungskette der geometrischen Raumverfahren sowie hochgenaue, konsistente und langzeitstabile Referenzrahmen mit hoher Zuverlässigkeit erforderlich.

Den Schwerpunkt im FB1 bildet die Bestimmung und Analyse der geometrischen Parameter zur Beschreibung der Gestalt und Orientierung der Erde. Durch Einbeziehung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Geodätischen Observatorium (GO) Wettzell, das gemeinsam vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der TU München im Rahmen der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) betrieben wird, ist die gesamte Verarbeitungskette abgedeckt: Messsysteme und -verfahren, Datengewinnung und -bereitstellung, Modellentwicklung und Analyse, Parameterbestimmung sowie die Realisierung von Referenzsystemen.

Bei der Datenauswertung und Kombination verschiedener Beobachtungsverfahren sind die Verwendung einheitlicher Konstanten, Konventionen und Modelle sowie eine unverzerrte Parameterschätzung wichtige Voraussetzungen. Es müssen einheitliche realitätsnahe physikalische Modelle verwendet werden, deren Parameter aus den Beobachtungen in konsistenten Referenzrahmen zu schätzen sind. Die Kombinationsmethoden auf der Ebene der Original-Beobachtungen (oder bedingungsfreier Normalgleichungen) sind weiter zu verbessern, um die jeweiligen Stärken der Verfahren optimal zu nutzen und die Schwächen zu eliminieren. Dabei sind die Verknüpfung der verschiedenen Beobachtungsverfahren, die Datumsfestlegung und die Erfassung von zeitabhängigen Parametern von grundlegender Bedeutung. Die Parameter des terrestrischen Referenzrahmens (Stationskoordinaten und deren zeitliche Variationen), des himmelfesten Referenzrahmens (Quasarkoordinaten) sowie die sie verbindenden Erdorientierungsparameter müssen in einer strengen Gesamtausgleichung gemeinsam bestimmt werden. Unerlässlich hierzu sind Untersuchungen zu optimalen Datumsbedingungen und zum Einfluss der Netzgeometrie, aber auch die Entwicklung geeigneter Strategien zur Verknüpfung der verschiedenen Beobachtungsverfahren sowie die Erfassung nicht-linearer Stationsbewegungen. Bei den Satellitenverfahren sollen die niederen harmonischen Kugelfunktionskoeffizienten des Erdschwerefeldes in die Parameterschätzung einbezogen werden, um Konsistenz zwischen geometrischen und gravimetrischen Größen zu erreichen.

Ein wesentlicher Schwerpunkt im FB1 ist die Mitarbeit des CGE in den wissenschaftlichen Diensten und Projekten der IAG, die auch zukünftig fortgeführt werden soll. Die Grundlagenforschung und die Mitwirkung in den geodätischen Diensten stehen dabei in enger Wechselbeziehung zueinander und profitieren erheblich voneinander. Das CGE liefert damit auch

einen wichtigen Beitrag, um geodätische Produkte auf dem höchsten Niveau der Forschung für eine weltweite Nutzergemeinschaft in Wissenschaft und Praxis zuverlässig bereitzustellen. Die Mitarbeit in den wissenschaftlichen Diensten beinhaltet den Betrieb von Beobachtungsstationen, die Sammlung, Archivierung und Verteilung der Beobachtungsdaten sowie die Datenauswertung und Erzeugung der geodätischen Produkte, die wiederum von zentraler Bedeutung für die generellen Forschungsziele des CGE sind. Schließlich liefern die Arbeiten im FB1 auch wichtige Beiträge für die geodätische Umsetzung der GGOS-Ziele.

Über die Nutzung zur Bestimmung von Referenzrahmen hinaus werden Daten der geometrischen Verfahren zur Untersuchung geowissenschaftlicher Prozesse aufbereitet und genutzt. Wichtiges Beispiel ist die Aufbereitung von Satellitenaltimetrie-Daten für Untersuchungen globaler Meeresspiegelvariationen, die Modellierung von Ozeangezeiten und die Ermittlung geostrophischer Ozeanströmungen (siehe auch FB2, Abbildung 8).

## Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

Die Forschung auf dem Gebiet der geometrischen Beobachtungsverfahren sowie die Weiterentwicklung der Auswertestrategien und Kombinationsmethoden zur Genauigkeitssteigerung der geodätischen Produkte wird vor allem durch die Kommissionen und wissenschaftlichen Dienste der IAG vorangetrieben. Dies sind insbesondere die Kommissionen 1 „Reference Frames“ und 4 „Positioning and Applications“ sowie der International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), der International GNSS Service (IGS), der International Laser Ranging Service (ILRS), der International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) und der International DORIS Service (IDS). Zu nennen ist auch der im Aufbau befindliche International Altimetry Service (IAS), woran das CGE maßgeblich beteiligt ist. Die Satellitenaltimetrie hat einen bereichsübergreifenden Charakter: Die genaue Vermessung der Meeresoberfläche durch Satellitenaltimetrie bestimmt nicht nur zwei Drittel der Figur der Erde, sondern liefert auch hochauflösende Schwerefelddaten (siehe FB2).

Die Arbeiten der geometrischen Raubeobachtungsverfahren werden innerhalb der verfahrensspezifischen Dienste (IGS, ILRS, IVS, IDS) weltweit koordiniert. Es wurden verschiedene Komponenten eingerichtet (u.a. Koordinierungsbüro, Beobachtungsnetze, Operationszentren für den Stationsbetrieb, Datenzentren, Analyse- und Kombinationszentren), an denen das CGE maßgeblich beteiligt ist. In den letzten Jahren konnten erhebliche Fortschritte hinsichtlich Umfang und Genauigkeit der geometrischen Beobachtungsverfahren sowie der daraus abgeleiteten Ergebnisse und Produkte (u.a. Stationskoordinaten, Erdorientierungsparameter, Satellitenbahnen) erzielt werden. Allerdings sind bisher auf internationaler Ebene die bei der Datenauswertung verwendeten Standards, Konventionen und Modelle bei den Analysezentren für die verschiedenen Beobachtungsverfahren noch nicht vollständig abgeglichen worden, was die Zuverlässigkeit und Konsistenz der Ergebnisse beeinträchtigt. Innerhalb des IERS werden aus den Daten der Raubeobachtungsverfahren der International Celestial Reference Frame (ICRF), der International Terrestrial Reference Frame (ITRF) sowie die beide Rahmen verbindenden Earth Orientation Parameters (EOP) berechnet. Die grundlegenden Standards und Konventionen sind in den „IERS Conventions“ (Petit und Luzum 2010) beschrieben. Die aktuelle Realisierung des terrestrischen Referenzsystems ist der ITRF2008, der durch eine gemeinsame Ausgleichung mit den EOP von zwei ITRS-Kombinationszentren, dem Institut Géographique National (IGN) in Frankreich und dem DGFI durch Kombination von VLBI-, SLR-, GNSS- und DORIS-Zeitreihen berechnet wurde (Altamimi et al. 2011, Angermann et al. 2010, Seitz et al. 2012). Die neueste Realisierung des zälestischen Referenzsystems ist der ICRF2.

Obwohl in den letzten Jahren signifikante Fortschritte hinsichtlich Methodik und Genauigkeit bei der Berechnung der IERS-Produkte erzielt wurden, bestehen noch einige Defizite. Eine wesentliche Unzulänglichkeit bei der gegenwärtigen Berechnung der terrestrischen Referenzrahmen ist die Darstellung der Zeitabhängigkeit der Koordinaten. Die Stationsbewegungen werden derzeit noch durch konstante Geschwindigkeiten repräsentiert, d.h., saisonale, episodische oder anomale Effekte werden nicht berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass bei Verwendung von Referenzpunkten zu unterschiedlichen Zeitpunkten die ITRF-Koordinaten nicht die tatsächliche Punktposition wiedergeben. Die daraus resultierenden Fehler liegen deutlich über der Messgenauigkeit. Die Kinematik des ITRF bezieht sich auf das geologisch-geophysikalische Modell NNR-NUVEL-1A, das ein langjähriges Mittel über geologische Zeiträume repräsentiert, die ausgedehnten Deformationszonen der Erde nicht erfasst und somit nicht mit der geforderten Genauigkeit für die heutige Zeit gilt. Ein weiteres Problem ist die Verknüpfung der verschiedenen Beobachtungsverfahren, da die geographische Verteilung guter Kolokationsstationen unzureichend ist. Auch die Datumsfestlegung des terrestrischen Referenzsystems birgt nicht zu vernachlässigende Probleme. Derzeit werden der Maßstab durch SLR und VLBI sowie der Koordinatenursprung nur durch SLR festgelegt, was bei der relativ schlechten Netzgeometrie für beide Verfahren problematisch ist. Ein weiteres Defizit ist, dass gegenwärtig der terrestrische und zälestische Referenzrahmen von den beteiligten Produktzentren unabhängig voneinander bestimmt werden und in Folge dessen Inkonsistenzen auftreten. Zudem basiert der ICRF ausschließlich auf VLBI-Daten und wird nur von einem Analysezentrum (ohne Kombination) berechnet.

Das CGE verfügt über eine langjährige Expertise auf dem Gebiet der geodätischen Referenzsysteme und der Raumbesichtungsverfahren. Durch die Einbeziehung des GO Wettzell wird die gesamte Verarbeitungskette von den geodätischen Messungen bis zur Bereitstellung geodätisch-geophysikalischer Parameter abgedeckt. Durch die Inbetriebnahme des Satellite Observing



**Abbildung 4:** VLBI- und SLR-Beobachtungsstationen des Geodätischen Observatoriums Wettzell (Foto: Neidhardt 2011).



**Tabelle 1:** Im CGE vorhandene Auswerte-Software im Bereich „Geometrische Verfahren“.

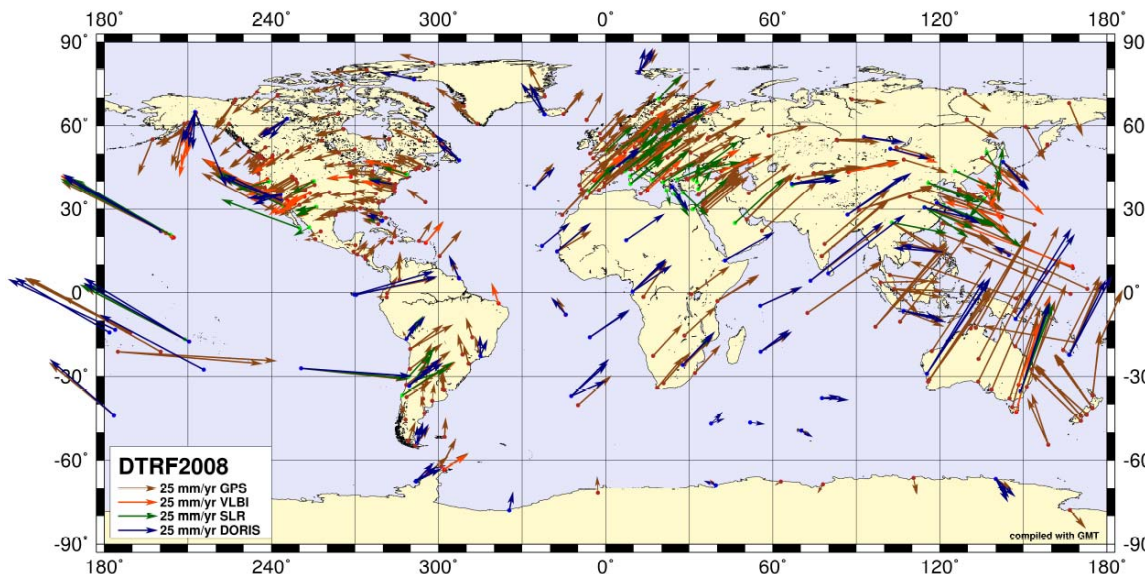
Institution	Software	Beobachtungsverfahren, Kurzbeschreibung
DGFI	Bernese GPS Software	GPS, SIRGAS-, TIGA- und Alpennetz-Auswertung
DGFI	OCCAM/DOGS-RI	Auswertung von VLBI-Daten, IVS-Analysezentrum
DGFI	DOGS-OC	Auswertung von SLR-Daten, ILRS-Analysezentrum
DGFI	DOGS-CS	ITRS- und IVS-Kombinationszentrum
DGFI	Altimeter-Software	Altimetrie, vielfältige Anwendungen
FESG	VLBI Field System	Steuerungssoftware für VLBI-Antennen (FESG, BKG)
FESG	SLR-Software	Steuerungssoftware für SOS-W (BKG, FESG)
FESG, IAPG	Erweiterte Bernese GPS Software	Globale GNSS-Lösungen, IGS-Reprozessierung, kombinierte GNSS-, SLR-, VLBI-Analysen auf Beobachtungsebene
KEG	Bernese GPS Software	GPS, EUREF-Auswertung, Beiträge zum IGS, Geodynamik (Island und Alpen)
KEG	GIPSY	GPS, Vergleichsrechnungen

System (SOS-W) und des TWIN Radioteleskopes (TTW) liefert das GO Wettzell wichtige Grundlagen für die Entwicklung neuartiger Beobachtungs- und Auswertekonzepte (siehe Abbildung 4).

Insgesamt liefern die vorhandene Expertise des CGE und die an den beteiligten Institutionen vorhandenen Softwaresysteme eine wichtige Voraussetzung für die Bearbeitung der Forschungsaufgaben im FB1 (siehe Tabelle 1). Für die Auswertung der geometrischen Raumbeobachtungsverfahren (VLBI, SLR, GNSS) ist jeweils mindestens eine Software vorhanden. Am DGFI wird seit vielen Jahren die institutseigene Software DOGS-CS für die Kombination der Beobachtungsverfahren und die ITRF-Berechnungen genutzt. Daneben verfügt das CGE über die Kombinationssoftware ADDNEQ2 der Bernese GPS Software. Damit ist eine durchgreifende Analyse und Kontrolle der Kombinationsergebnisse möglich.

Durch die Beteiligung des CGE an mehreren Forschungsprogrammen wurden wichtige Vorarbeiten für diesen Forschungsbereich geleistet. Dazu gehören die Weiterentwicklung der Kombinationsmethoden sowie der Aufbau eines ITRS-Kombinationszentrums im IERS-Projekt, das im Rahmen des Geotechnologienprogramms vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde. In der Funktion als ITRS-Kombinationszentrum hat das DGFI kombinierte Lösungen für die beiden neuesten Realisierungen des terrestrischen Referenzsystems, ITRF2005 und ITRF2008, berechnet. Dazu wurden Zeitreihen von Stationskoordinaten und Erdorientierungsparametern der Raumbeobachtungsverfahren VLBI, SLR, GNSS und DORIS über einen langen Zeitraum (bis zu 28 Jahre) auf Normalgleichungsebene kombiniert. Die am DGFI verwendete Kombinationsmethodik und die ITRF-Ergebnisse sind in verschiedenen Publikationen dargestellt (Angermann et al. 2009, Seitz 2009, Seitz et al. 2012). Abbildung 5 zeigt die horizontalen Stationsgeschwindigkeiten der am DGFI berechneten Lösung DTRF2008 (Seitz et al. 2012).

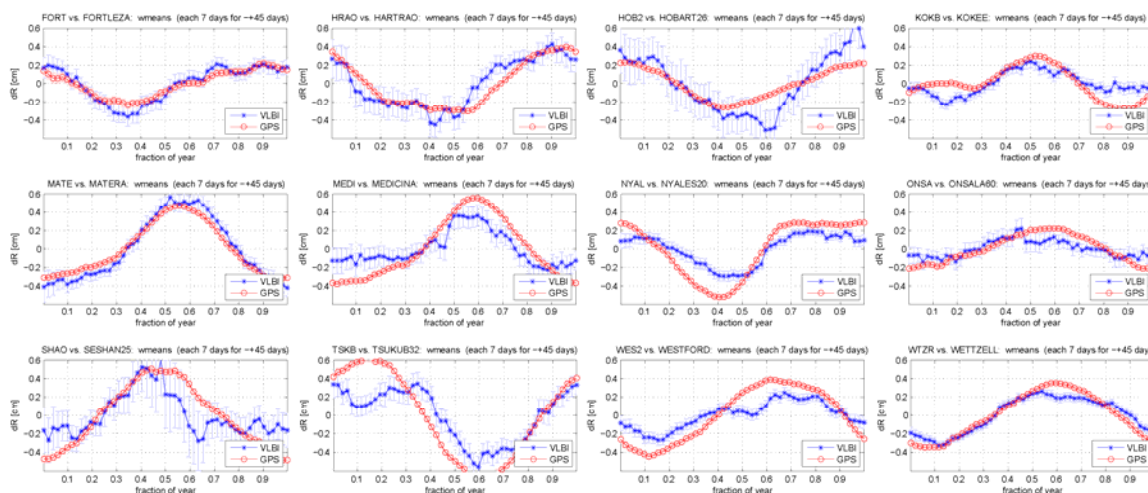
Die IERS-Arbeiten lieferten auch die Grundlage für das Nachfolgeprojekt GGOS-D (Rothacher et al. 2011), wodurch auf nationaler Ebene erhebliche methodische Fortschritte gegenüber dem internationalen Stand erzielt werden konnten. An diesen Arbeiten war das CGE maßgeblich beteiligt. Wesentliche Ziele von GGOS-D waren die Erzeugung konsistenter, mit einheitlichen Standards und Modellen reprozessierter Beobachtungsreihen der geodätischen Raumverfahren, eine gemeinsame Bestimmung des terrestrischen und zälestischen Referenzrahmens sowie die Berechnung konsistenter Zeitreihen geodätisch-geophysikalischer Parameter. Die aufwändige Reprocessing der globalen GPS-Daten wurde gemeinsam von GFZ Potsdam, TU München und



**Abbildung 5:** Horizontale Stationsgeschwindigkeiten der TRF-Lösung DTRF2008.

TU Dresden durchgeführt (Steigenberger et al. 2006). Ein Schwerpunkt der Arbeiten war eine detaillierte Analyse und ein Vergleich der Stationskoordinatenzeitreihen der verschiedenen geometrischen Verfahren. Abbildung 6 zeigt die mittleren Jahressignale der Höhenkomponente von 12 GPS- und VLBI-Kolokationsstationen (Tesmer et al. 2009). Neben den geometrischen Beobachtungsverfahren VLBI, SLR und GPS wurden im GGOS-D Projekt auch Satellitenaltimetrie-Daten homogen prozessiert und daraus Zeitreihen für die Variationen des Meeresspiegels und des Erdschwerefeldes berechnet.

Wichtige Grundlagen für die Arbeiten im FB1 wurden auch durch die CGE-Beteiligung an der DFG-Forschergruppe „Erdrotation und globale dynamische Prozesse“ sowie durch die Vorbereitungsarbeiten der im Herbst 2011 eingerichteten DFG-Forschergruppe „Referenzsysteme“ geleistet (Nothnagel et al. 2010).



**Abbildung 6:** Mittleres jährliches Signal in der Höhenkomponente von 12 Kolokationsstationen aus den homogen prozessierten VLBI- und GPS-Beobachtungsreihen.

Das CGE arbeitet seit vielen Jahren auf dem Gebiet der regionalen Referenzsysteme, ist am TIGA-Projekt zur Überwachung von Meeresspiegeln beteiligt und betreibt sieben GPS-Stationen im Alpenraum zur Deformationsüberwachung. Das DGFI ist im Rahmen von SIRGAS in Süd- und Mittelamerika aktiv (Sanchez et al. 2010, Seemüller et al. 2010). Die Kommission für Erdmessung und Glaziologie (KEG), Abteilung Erdmessung, beteiligt sich als Analysezentrum an den EUREF-Aktivitäten und koordiniert das Projekt „EPN Reprocessing“ (Völksen 2009). Gleichzeitig bearbeitet die Gruppe Deformationsnetze auf Island und in den Alpen und betreut einige GNSS-Permanentstationen in den jeweiligen Netzen.

## Programm und Themen

Die geplanten Arbeiten im Forschungsbereich 1 (FB1) „Geometrische Verfahren“ stützen sich auf eine langjährige Expertise des CGE auf dem Gebiet der geodätischen Referenzsysteme und der Raubeobachtungsverfahren. Die beteiligten Institutionen haben bereits in mehreren Forschungsprogrammen und Verbundprojekten erfolgreich zusammengearbeitet, wodurch die Ausrichtung der geplanten Arbeiten maßgeblich geprägt wird.

Das Programm beinhaltet neben den Arbeiten zur Grundlagenforschung auch die Mitarbeit in den Kommissionen und wissenschaftlichen Diensten der IAG. Das CGE ist in verschiedenen Funktionen an den geometrischen Diensten der IAG beteiligt (siehe Übersicht auf S. 7f). Besonders relevant für die Arbeiten im FB1 sind die Beiträge des CGE zum IERS sowie zu den technikspezifischen Diensten IGS, ILRS und IVS. Dabei fließen die Forschungsergebnisse direkt in die Arbeiten der Dienste ein, und Ergebnisse aus den Produkten der Dienste geben Rückschlüsse für weiteren Forschungsbedarf.

Die Arbeiten im FB1 sind untergliedert in fünf Themen. Die Mitarbeit in den Kommissionen und Diensten der IAG erstreckt sich über alle Themen.

### (1) Messsysteme, Datengewinnung und -bereitstellung

Das CGE ist insbesondere mit dem GO Wettzell maßgeblich am Betrieb von Messsystemen für VLBI, SLR und GNSS beteiligt. Dabei sind besonders die neu installierten Messsysteme Satellite Observing System Wettzell (SOS-W) und TWIN Radioteleskop Wettzell (TTW) zu nennen, deren Betrieb und Datengewinnung eine zentrale Aufgabe innerhalb dieses Themas darstellen. Weiterhin umfasst dieses Thema den Betrieb von permanenten GNSS-Stationen an Gezeitenpegeln im Rahmen des IGS-Projektes „Tide Gauge Benchmark“ (TIGA), im Referenzrahmen für Lateinamerika (SIRGAS) sowie im Alpenraum. Die Daten dieser GNSS-Stationen werden im CGE archiviert und bereitgestellt. Das CGE betreibt auch das globale ILRS-Daten- und Operationszentrum EUROLAS Data Center (EDC). Die Methoden zur Datengewinnung und -bereitstellung sind kontinuierlich weiterzuentwickeln, um die wachsenden Anforderungen im Bereich Datenmanagement erfüllen zu können.

### (2) Modellentwicklung und Analyse der geometrischen Raubeobachtungsverfahren

Die Analyse der geometrischen Raumverfahren stützt sich auf die im CGE vorhandenen Software-Systeme für GNSS (Bernese GPS Software), SLR (DOGS-OC, erweiterte Bernese GPS Software), VLBI (OCCAM/DOGS-RI, erweiterte Bernese GPS Software). Für DORIS sind Normalgleichungen oder Lösungen von Kooperationspartnern bzw. über den International DORIS Service (IDS) verfügbar. Derzeit existieren zwischen den Software-Systemen noch systematische Differenzen, die u.a. von der unterschiedlichen Behandlung physikalischer Modelle und mathematischer Parametrisierungen herrühren. Ziel ist eine Vereinheitlichung der

Standards, Modellbildung und Parametrisierung in den verschiedenen Software-Systemen, damit die Beobachtungen der verschiedenen Verfahren einheitlich verarbeitet und zu einer konsistenten Gesamtlösung kombiniert werden können. Dabei muss die Modellbildung ständig an den neuesten Stand der Forschung angepasst werden. Die Untersuchungen zu den physikalischen Modellen konzentrieren sich auf die atmosphärische Refraktion in der Messung, atmosphärische Auflasteffekte, den Einfluss von Erd- und Ozeangezeiten (einschließlich Auflasteffekten) auf Satellitenbahnen und Stationen, die harmonischen Erdschwerefeldkoeffizienten niedrigen Grades sowie die mathematische Modellierung der zeitlichen Variationen der Erdorientierungsparameter. Bei der Auswertung von GNSS-Beobachtungen sollen die gegenwärtig verwendeten empirischen Satellitenbahnmodelle weiter verbessert werden. Darin dürfte auch der Schlüssel für die in verschiedenen GNSS-Zeitreihen sichtbaren anomalen drakonitischen Perioden zu finden sein. Zudem müssen Strahlungsdruckmodelle hoher Qualität für die Galileo-Satelliten und die neuen GPS-Blocktypen entwickelt werden. Eine weitere Aufgabe in diesem Themenbereich ist die Aufbereitung und Bereitstellung konsistenter Altimeterdaten. Dies erfordert eine kontinuierliche Harmonisierung und Kalibrierung der nahezu 20-jährigen Beobachtungsreihe von Satellitenaltimetermessungen (Dettmering und Bosch 2010).

### **(3) Analyse und Weiterentwicklung der Kombinationsverfahren**

Die Kombination der geometrischen Raumverfahren wird im CGE auf der Ebene bedingungs-freier Normalgleichungen (mit DOGS-CS am DGFI) sowie auf Beobachtungsebene (mit der erweiterten Bernese GPS Software am IAPG/FESG) vorgenommen. Die Kombination von GNSS-Daten erfolgt mit dem Programm ADDNEQ2 der Bernese GPS Software. Schwerpunkte der Arbeiten sind eine Verbesserung und Verfeinerung der Kombinationsmethoden, u.a. Gewichtung, Berücksichtigung nicht-linearer Stationsbewegungen, Datumsfestlegung. Diese Themen sollen im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Referenzsysteme“ im Detail studiert werden. Die Methoden zur Datumsfestlegung sollen weiter verbessert werden, wobei insbesondere GNSS- und LEO-Beobachtungen unter Verwendung verbesserter Satellitenbahnmodelle einzubeziehen sind. Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Verknüpfung der (globalen) Netze der verschiedenen Beobachtungsverfahren. Dazu dienen lokale terrestrische Verbindungsmessungen („local ties“) zwischen direkt benachbarten Instrumenten verschiedener Verfahren auf Kolokationsstationen. Die Qualität der Kombinationsergebnisse hängt entscheidend von der Auswahl geeigneter Stationen ab. Die Strategie dazu soll weiter verbessert werden. Es soll auch untersucht werden, welchen Beitrag andere gemeinsame Parameter oder die Kolokation auf Satellitenebene zur Stabilisierung der Verknüpfung der Beobachtungsverfahren liefern. Mit der erweiterten Bernese GPS Software sollen z.B. auf Beobachtungsebene neben Troposphärenparametern auch Uhrkorrekturparameter als zusätzliche gemeinsame Parameter in die Kombination einbezogen werden. Besondere Beachtung verdient dabei die gemeinsame Verarbeitung von GNSS- und VLBI-Beobachtungen. Eine weitere wichtige Aufgabenstellung ist die Entwicklung und Implementierung geeigneter Methoden zur Kombination auf Epochenebene (z.B. auf wöchentlicher oder monatlicher Basis). Herausforderungen dabei sind die Verknüpfung der Verfahren sowie eine stabile Datumsfestlegung dieser Epochen-Lösungen. Als Hauptziel sind geeignete Kombinationsmethoden für eine konsistente Bestimmung des zälestischen und des terrestrischen Referenzrahmens sowie der EOP zu entwickeln.

### **(4) Berechnung konsistenter globaler und regionaler Referenzrahmen**

Ein Schwerpunkt der Arbeiten ist die Berechnung des terrestrischen Referenzrahmens. Diese Aufgabe hat das DGFI innerhalb des IERS seit 2001 als ITRS Combination Center übernom-

men. Zusätzlich zu den offiziellen ITRS-Berechnungen sollen aber auch die neuesten Forschungsergebnisse und die verfeinerten Kombinationsmethoden angewendet werden, um verbesserte Realisierungen des globalen Referenzsystems zu berechnen. Ein weiteres Ziel ist die konsistente Bestimmung des zälestischen und terrestrischen Referenzrahmens, eine Aufgabe, die im Projekt „Consistent celestial and terrestrial reference frames by improved modelling and combination“ der DFG-Forschergruppe „Referenzsysteme“ gemeinsam mit dem BKG bearbeitet werden soll. Neben der klassischen Kombination von Mehrjahreslösungen (bzw. Normalgleichungen) sollen auch Ergebnisse für die Referenzrahmen auf Basis von Epochenkombinationen abgeleitet werden. Die aus beiden Ansätzen resultierenden Ergebnisse sollen verglichen und analysiert werden. Dieses vierte Thema beinhaltet auch grundlegende Arbeiten zu regionalen Referenzsystemen sowie die Berechnung regionaler Referenzrahmen für Lateinamerika (SIRGAS) und Beiträge zum europäischen Referenzrahmen (EUREF). Eine weitere Aufgabe besteht darin, die Berechnungen des globalen GPS-Gezeitenpegel-Netztes (TIGA) fortzuführen, um damit auch eine Grundlage für ein einheitliches Welthöhensystem zu schaffen.

#### **(5) Anwendungsstrategien**

Aus den geometrischen Verfahren sind geodätisch-geophysikalische Parametersätze und Parameterzeitreihen für Anwendungen in der Erdsystemforschung (siehe FB3) und für die Kombination mit Schwerefeld-Parametern (siehe FB2, FB4) aufzubereiten. Fundamental für die Erzeugung konsistenter und in ihrem Langzeitverhalten interpretierbarer Zeitreihen sind die unter (4) behandelten hochgenauen und langzeitstabilen Referenzrahmen. Wesentliche, für die Erdsystemforschung weiter zu erschließende Ergebnisse aus GNSS, VLBI und SLR/LLR sind Zeitreihen von Stationskoordinaten, Erdorientierungsparametern und Atmosphärenparametern. Satellitenbahnparameter sind insbesondere für die Verknüpfung zwischen Geometrie und Schwerefeld (siehe FB2 und FB4) wesentlich. Als Schwerpunkt in der Auswertung von Satellitenaltimetrie sollen Arbeiten zur Bereitstellung von Altimetermessungen und zur Bestimmung der Geometrie und Kinematik des Meeresspiegels (siehe auch FB3) fortgeführt und weiterentwickelt werden. Die Einbeziehung neuer Missionen bildet hier eine wichtige Aufgabe, zumal neue Missionen (wie CryoSat-2, SARAL, Sentinel-3) neuartige Sensoren mit verbessertem Auflösungsvermögen tragen und damit erweiterte Anwendungsmöglichkeiten, etwa in Meereisgebieten oder in Küstennähe, versprechen. Ergebnisse neuartiger Altimetermissionen sowie der ICESat-Laseraltimetrie sollen weiterhin für die Untersuchung von Geometrie und Geometrie-Änderungen kontinentaler Eismassen wie des Grönländischen und Antarktischen Eisschildes aufbereitet werden. Die Möglichkeiten bildgebender SAR-Missionen (wie TerraSAR-X, TanDEM-X) sollen, unter anderem in Kooperation mit der DLR, für Anwendungen auf die Kryosphäre und darüber hinaus erschlossen werden. Mit seiner hohen räumlichen Auflösung bietet SAR eine ideale Ergänzung zu Punktpositionierungsverfahren (wie GNSS) und Altimetrie für die Erfassung von Topographie und Deformationsverhalten von Oberflächen.



## Forschungsbereich 2: Schwerefeld

### Motivation und Zielsetzung

Das Schwerefeld dient zum Einen als Referenzfläche für eine Vielzahl von dynamischen Prozessen im Erdsystem, zum Anderen spiegelt das Schwerefeld und dessen zeitliche Variation selbst Massenverlagerungen im Erdsystem wider und dient damit auch zur Beschreibung von geophysikalischen Prozessen. Beispielhaft zu nennen sind hier die Arbeitsfelder Geodäsie, Geophysik, Ozeanographie, Hydrologie, Glaziologie und Navigation. Aus diesem Grund ist die Beobachtung, Bestimmung und Modellierung des statischen und zeitvariablen Erdschwerefeldes sowohl global als auch regional, in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen, eine zentrale Aufgabe im Arbeitsspektrum des CGE und ist in vielen Aspekten mit den anderen vier CGE-Forschungsbereichen verknüpft.

Entscheidend zur Bestimmung des Erdschwerefeldes ist es, tiefes Verständnis in Theorie und Anwendung über die verschiedenartigen Sensoren zur Beobachtung des Schwerefeldes zu erlangen. Dies schließt Beobachtungssysteme im Weltraum, auf Flugzeugen sowie auf der Erdoberfläche ein. Neben Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung bekannter Beobachtungstechniken und der detaillierten Sensoranalyse sollen auch neuartige Beobachtungskonzepte entwickelt werden. Hierzu sind auch entsprechende Simulationsprozesse weiterzuentwickeln, die es erlauben, belastbare Aussagen über zukünftige Beobachtungs- und Missionsszenarien zu tätigen. Diese Arbeiten gehen Hand in Hand mit Arbeiten des FB4, wo Grundlagen für Simulatoren neuer Sensorik erarbeitet werden. Das theoretische Fundament für die Nutzung der Beobachtungen soll insofern weiterentwickelt werden, als dass die nun verfügbaren höchstpräzisen Messungen in einem gemeinsamen Ansatz zur Schwerefeldbestimmung verwendet werden können. Hierzu sind regionale und globale Auswertemodelle weiterzuentwickeln, die es erlauben, aus den aufbereiteten Beobachtungen entsprechende Modelle des Erdschwerefeldes mit Genauigkeiten und Auflösungen zu berechnen, die im Wesentlichen nur von den verfügbaren Beobachtungsgenauigkeiten und der Datenverteilung abhängen. In Kooperation mit potenziellen Nutzern sind Anwendungsstrategien für die globalen und regionalen Modelle zu entwickeln, um das Potenzial der Schwerefeldmodellierung innerhalb der Erdsystemforschung weiter zu manifestieren.

Zu wichtigen Aufgaben im Hinblick auf das GGOS gehören: die konsistente Behandlung der Schwerefeldkoeffizienten niederen Grades als Teil der Datumsfestlegung (koordiniert mit dem Bureau of Standards and Conventions und mit dem FB1), die Nutzung des Geoids als physikalische Referenzfläche (Höhensysteme), die Beobachtung von Massentransportprozessen sowie die Etablierung zukünftiger Schwerefeldmissionen als Teil des globalen GGOS-Beobachtungskonzepts.

Der Forschungsbereich 2 hat enge thematische Verflechtungen mit allen anderen Bereichen des CGE, daher ist eine enge Verknüpfung der Arbeiten notwendig. Beispielhaft zu nennen sind hierfür: gemeinsame Bestimmung von Geometrie und Schwerefeld, Schwerefeld und Datum, Schwerefeld als Element der Erdsystemforschung, gemeinsame Methodenentwicklung, Analyse neuartiger Sensoren hinsichtlich Schwerefeldbestimmung.

## Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

### (1) Beobachtungssysteme und Sensoranalyse

Zur Schwerfeldbestimmung werden Daten von Beobachtungssystemen auf Satelliten, Flugzeugen und auf der Erdoberfläche verwendet. Folgende Sensoren werden derzeit eingesetzt: Bahnbeobachtungen zwischen Satelliten (Satellite-to-Satellite Tracking, SST), Satellitengradiometrie, Satellitenaltimetrie, Fluggravimetrie und terrestrische Gravimetrie. Die globalen Schwerfeldmodelle stützen sich im Wesentlichen auf SST und Gradiometrie, zum Teil ergänzt durch terrestrische Gravimetrie, Fluggravimetrie und aus Altimetrie abgeleitete Informationen. Die beiden letzteren Datenquellen werden dazu verwendet, die limitierte räumliche Auflösung der Satellitenverfahren deutlich zu steigern. Im Bereich der Satellitenverfahren (SST und Gradiometrie) wurden im Rahmen der Missionen GRACE und GOCE vielfältige Techniken entwickelt, um das Fehlverhalten der Sensoren, deren Kopplung mit anderen satellitentechnischen Elementen, wie zum Beispiel Lagekontrolle und Elektronik, aber auch um mögliche Wechselwirkungen mit geophysikalischen Zuständen und Prozessen in der umgebenden Atmosphäre besser zu verstehen (Peterseim et al. 2011). Hierfür stehen Prozessketten für die Aufbereitung der Rohdaten von GRACE-SST und GOCE Gradiometrie zur Verfügung, die für weitergehende Untersuchungen modifiziert werden können (Frommknecht 2008, Stummer et al. 2011). Satellitenaltimetrie stellt in erster Linie kein originäres Beobachtungssystem zur Schwerfeldbestimmung dar, jedoch können mit entsprechenden Methoden Schwereanomalien bzw. Schweregradienten bestimmt werden. Um diese Techniken sinnvoll einsetzen zu können, sind detaillierte Kenntnisse über die Eigenschaften der Altimeterdaten erforderlich, welche im Rahmen der bisherigen Arbeiten zur Harmonisierung der Missionsdaten erlangt werden konnten. Im Bereich der Fluggravimetrie werden aus technologischer Sicht international zwei Konzepte verfolgt, nämlich die Messung entweder mit speziellen, einachsigen Fluggravimetern auf stabilisierter Plattform oder die Auswertung der Daten einer Strapdown-Trägheitsplattform (SINS). Im CGE steht ein SINS-System zur Verfügung, auf dessen Basis erste Versuche unternommen wurden (Gerlach et al. 2010). Im Bereich der terrestrischen Gravimetrie stehen einerseits Schweredaten aus verschiedenen Quellen zur Verfügung, die für vielfältige Zwecke eingesetzt werden und somit auch charakterisiert werden müssen, andererseits wurden instrumentelle Untersuchungen an den verfügbaren Gravimetern durchgeführt. Insbesondere sei hier der Aufbau und Unterhalt einer gravimetrischen Eichstrecke in Garmisch-Partenkirchen (Eibsee–Zugspitze) erwähnt, wo vergleichende Analysen von Gravimetern mehrerer Institutionen durchgeführt wurden.

### (2) Simulationsprozesse

Für die Realisierung der gegenwärtigen Schwerfeld-Satellitenmissionen GRACE und GOCE war die Verfügbarkeit von Simulatoren eine Voraussetzung. Damit wurde im Vorfeld der Mission untersucht, welche Genauigkeiten man auf Basis der geplanten Instrumentierung erreichen kann bzw. welche Art von statischen und zeitvariablen geophysikalischen Signalen erfasst werden können. Speziell hierzu wurde ein semi-analytischer Simulator auf Basis einer Fehlerfortpflanzung entwickelt, der sehr schnell für verschiedene Satelliten- und Instrumentenszenarien Aussagen über die erreichbaren Genauigkeiten liefern kann. Dieser Simulator ist operationell verfügbar und derzeit für Studien zu zukünftigen Schwerfeldmissionen im Einsatz (Murböck 2011). Weiter steht ein Closed-Loop-Simulator basierend auf vollen Normalgleichungen zur Verfügung, auf dessen Basis beliebige statische und zeitvariable Schwerfeldeffekte und unterschiedliche Beobachtungstechniken und Satelliteninformationen in einer geschlossenen Umgebung von der Signalgenerierung bis zur Rückschätzung von Schwerfeldmodellen untersucht werden können. Insbesondere kann auch farbiges Rau-



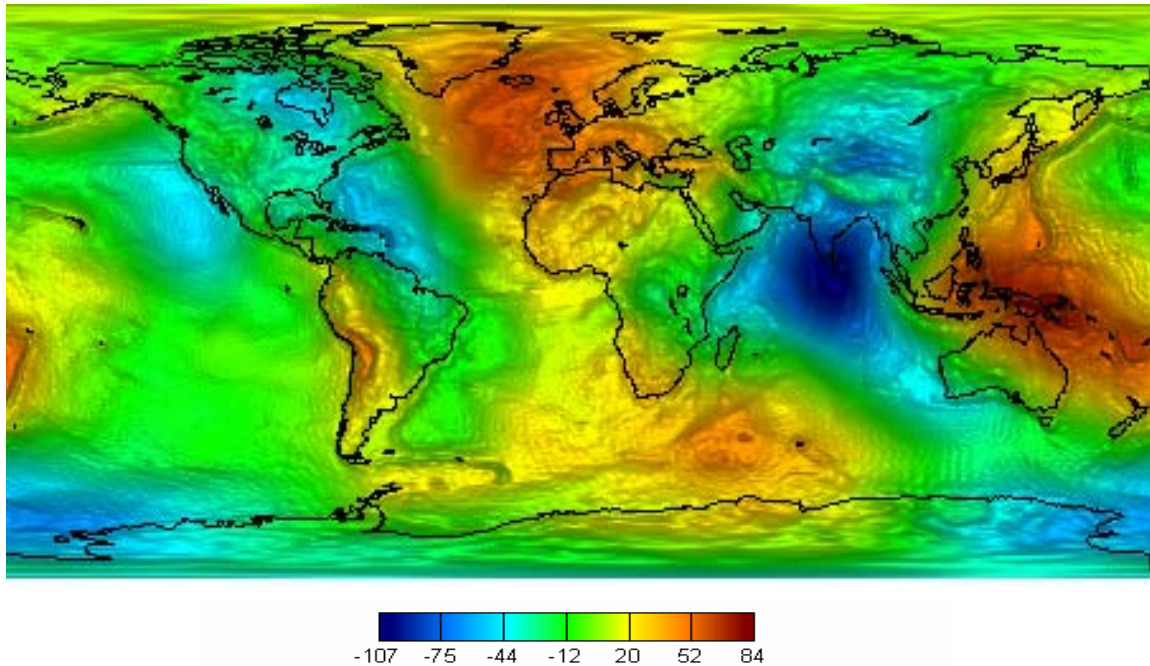
schen der Messsysteme simuliert werden. Damit können nicht nur die Fehler betrachtet, sondern auch die Signale in einer Vorwärtsrechnung eingebunden werden, um herauszufinden, wie gut sich gewisse geophysikalische Signale mit bestimmten Satellitenkonfigurationen und Instrumenten beobachten lassen. Als Eingangsgrößen für diesen Closed-Loop-Simulator wurde eine Simulation des zeitvariablen Schwerefeldes über 12 Jahre mit 6-stündiger Auflösung auf Basis von gekoppelten geophysikalischen Modellen für Atmosphäre, Ozean, Hydrologie, Eis und Prozesse der festen Erde berechnet (Gruber et al. 2011a). Diese Eingangsdaten sowie die beiden Simulatoren bilden die Basis für die weiteren Entwicklungen, die neben der Verarbeitung von reinen Satellitendaten auch Aussagen zur Notwendigkeit von gravimetrischer und altimetrischer Information für zukünftige statische und zeitvariable Schwerefelder liefern sollen.

### **(3) Theorie und Aufbereitung der Beobachtungen**

Die Aufbereitung der K-Band-Entfernungsmessungen von GRACE ist speziell hinsichtlich der Rolle der Atmosphäre untersucht worden (Zenner et al. 2010). Außerdem sind diese Beobachtungen aufbereitet worden, so dass sie für globale und regionale Schwerefeldbestimmung mit dem Energieintegral-Ansatz verwendet werden können. Für GOCE wurde die Prozessierungskette von den GOCE-Beschleunigungen zu den Gradienten implementiert (Rummel et al, 2011a). Es konnten beispielsweise alternative Ansätze für die Aufbereitung der GOCE-Gradienten- und Orientierungsinformation entwickelt werden, die nun Teil der offiziellen Level1B-Prozessierung der ESA sind (Stummer et al. 2011). Damit steht eine Software zur detaillierten Analyse und Weiterverarbeitung der Rohmessungen zur Verfügung, welche für vielfältige Untersuchungen unabhängig von den offiziellen Produkten der ESA verwendet werden kann. Insbesondere steht damit in Kombination mit der in Punkt (4) beschriebenen Schwerefeldmodellierung die gesamte Prozessierungskette von der Rohmessung bis zum finalen globalen Schwerefeldmodell zur Verfügung. Schließlich sind die theoretischen Grundlagen zur Berechnung von Schweregradienten aus Satellitenaltimeter-Daten aufbereitet und entsprechende Software entwickelt worden (Bouman et al. 2011). Neben den satellitengestützten Beobachtungen wurden auch für terrestrische und flugzeuggestützte Beobachtungen die notwendigen Aufbereitungsschritte und Korrekturen detailliert analysiert, um diese in einem gemeinsamen Ansatz zusammen mit der Satelliteninformation verarbeiten zu können.

### **(4) Regionale und globale Modellbildung**

Die verfügbaren Beobachtungen des Erdschwerefeldes werden üblicherweise durch ein funktionales Modell beschrieben und die Parameter dieses Modells werden durch Ausgleichsmethoden geschätzt. Für globale Modelle sind dies in der Regel sphärische Kugelfunktionsreihen, während für regionale Methoden häufig Wavelets als Basisfunktionen (Schmidt et al. 2006) oder die Kollokationsmethode (Pail et al. 2010b) eingesetzt werden. Allen gemeinsam ist, dass der Parameterraum üblicherweise auf Schwerefeldgrößen begrenzt ist und nur marginal Zusatzparameter mitgeschätzt werden. Eine kombinierte Verarbeitung von geometrischen Beobachtungen der Erdoberfläche und Beobachtungen des Erdschwerefeldes findet bisher nur in sehr eingeschränktem Ausmaß statt. Weitere Aspekte, die für globale Analysen eine Rolle spielen, sind zum Einen die Wahl optimaler Basisfunktionen und zum Anderen die starke Zunahme an Parametern bei Kombination von allen verfügbaren Beobachtungstypen. Im Rahmen des ESA-Projekts GOCE High-level Processing Facility (GOCE-HPF) konnte das erste globale Schwerefeldmodell rein aus GOCE-Daten, basierend auf dem „Time-wise“ Ansatz und der Lösung voller Normalgleichungen, gerechnet werden (siehe Abbildung 7; Pail et al. 2011). Daneben wurden auch die weltweit ersten globalen

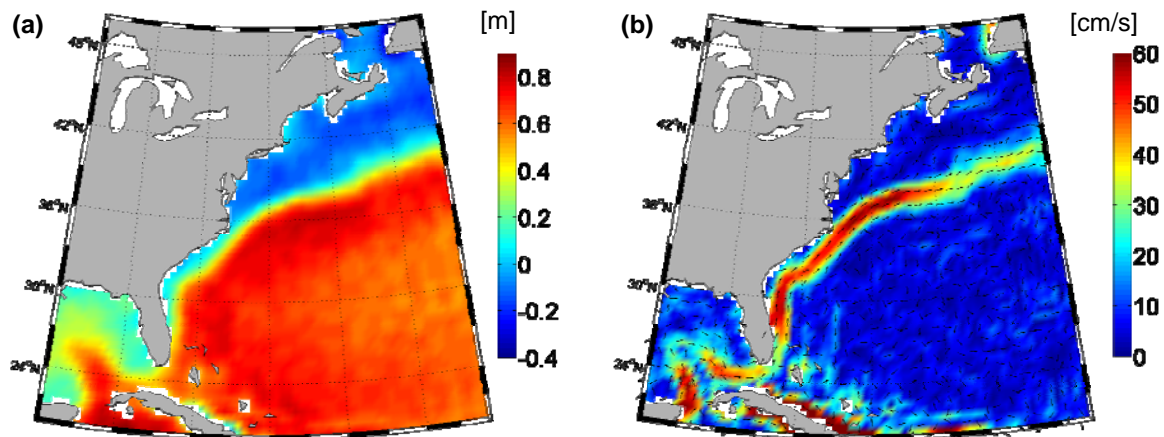


**Abbildung 7:** Geoidhöhen [m], aus GOCE-Daten von ca. 6 Monaten berechnet.

konsistenten Kombinationslösungen aus GRACE- und GOCE-Daten berechnet (GOCO; Pail et al. 2010a). Die Anzahl der Kugelfunktionskoeffizienten ist trotz der neuesten Entwicklungen in Rechentechnik und Numerik in den verfügbaren Schwerefeldmodellen auf etwa Grad und Ordnung 360 beschränkt, wenn man die volle Kovarianzinformation berücksichtigen will. Durch Nutzung von Höchstleistungsrechnern und Weiterentwicklung der Rechentechniken konnten testweise erste kombinierte Schwerefeldlösungen aus terrestrischen und Satellitendaten bis Grad 600 auf Basis voller Normalgleichungen berechnet werden. Erste Versuche mit Lösungen bis Grad 720 sind im Gange, bedürfen aber noch weiterer Anstrengungen, um die Rechenoperationen zu optimieren. Ein besonders wichtiger Aspekt ist dabei die korrekte Aufbereitung von terrestrischen und Satellitenaltimetrie-Daten, die Parametrisierung von systematischen Signalanteilen in terrestrischen Datensätzen, sowie die relative Gewichtung der Einzeldatensätze im Zuge der Kombination (Fecher 2008). Ein weiterer Aspekt ist die Parametrisierung des zeitvariablen Schwerefeldanteils. In den gängigen Auswertungen werden meist lineare Trends oder höchstens jährliche Variationen einiger Koeffizienten mitgeschätzt, was die Realität nur teilweise widerspiegelt. Zur Überprüfung der Genauigkeit der berechneten Schwerefelder werden Bahntests und Vergleiche mit unabhängigen Beobachtungen (z.B. GPS-Nivellement) durchgeführt, sowie mit Hilfe der Schwerefeldlösungen geschätzte geophysikalische Signale auf deren Plausibilität untersucht. Bereits mit den heute erreichbaren Genauigkeiten der Schwerefelder ist deren unabhängige Validierung nur noch eingeschränkt möglich (Gruber et al. 2011b).

## (5) Anwendungsstrategien

Aus der Kombination von einem globalen Schwerefeldmodell und Altimetrie lässt sich die Mittlere Dynamische Topographie (MDT) bestimmen (Abbildung 8). Allerdings ist dies mit befriedigender räumlicher Auflösung erst mit den Daten der GRACE- und vor allem der GOCE-Mission möglich (Bingham et al. 2011). Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Schwerefeldmodell und die Altimeter-Daten einen unterschiedlichen spektralen Gehalt ha-



**Abbildung 8:** Schätzung der Mittleren Dynamischen Topographie (MDT) unter Nutzung des kombinierten GOCE-GRACE-Schwerefeldmodells GOCO02S (a) und daraus abgeleitete geostrophische Oberflächenströmungen (b).

ben und daher einheitlich gefiltert werden müssen (Albertella und Rummel 2009). Es wurden ein globaler sowie ein Profil-Ansatz entwickelt, angewendet und miteinander verglichen. Untersuchungen zur Verwendung von Kovarianzinformation von Schwerefeld und Altimetrie im Zuge des Assimilationsprozesses sind im Gange. Außerdem wurden Untersuchungen durchgeführt, um in einem regionalen Ansatz mithilfe geeigneter Parametrisierung ein regionales Schwerefeld sowie die MDT aus Altimeter-Daten zu schätzen. Um geometrische Höhen (z.B. aus GNSS) in physikalische Höhen transformieren zu können, muss die Lage der Äquipotenzialfläche im terrestrischen Referenzsystem bekannt sein. Zur Festlegung und Analyse des gravimetrischen und des vertikalen Bezugsrahmens wurden Geoid bzw. Quasigeoid durch die Kombination geometrischer und gravimetrischer Beobachtungen in einer gemeinsamen Ausgleichung bestimmt. Dieses Bezugssystem muss darüber hinaus die präzise Vereinheitlichung aller weltweit existierenden lokalen Höhensysteme ermöglichen. Dabei stellt sich als zentrale Aufgabe, die Niveaudifferenzen zwischen den lokalen Referenzniveaus und dem globalen System zu bestimmen. Entsprechende Methoden zur Berechnung der Niveaudifferenzen, sowie um den Einfluss des globalen Modells beurteilen zu können, wurden entwickelt und zum Teil implementiert. Schwerefelddaten aus z.B. Fluggravimetrie, terrestrischen Messungen oder GRACE werden häufig zur geophysikalischen Analyse und Modellierung eingesetzt. So sind z.B. das Sumatra- (2004) und das Chile-Erdbeben (2010) in den GRACE-Daten sichtbar. Es wurden erste Untersuchungen zur Sensitivität der GOCE-Gradienten bzgl. sehr schwerer Erdbeben (Chile 2010, Japan 2011) begonnen. Weiter wird in Kooperation mit Partnern aus der Geophysik der Einfluss von GOCE- und GRACE-Daten für die Modellierung von Subduktionszonen und lithosphärischen Prozessen sowie für die Ermittlung der antarktischen Eismassenbilanz untersucht (Rummel et al. 2011b). Schließlich wurden für die Definition zukünftiger Schwerefeld-Satellitenmissionen die Anforderungen von Anwendern bzgl. der zeitlichen und räumlichen Auflösung des Schwerefelds inventarisiert und mit möglichst realistischen Simulationen auf deren Realisierbarkeit untersucht.

## Programm und Themen

### (1) Beobachtungssysteme und Sensoranalyse

Neben den klassischen erdgebundenen Beobachtungsverfahren zur Bestimmung von Schwerefeldgrößen (Nivellement, terrestrische Gravimetrie, Zenitkameras), die punktuell Information liefern, spielen heute zur flächenhaften Vermessung des Erdschwerefeldes die satelliten- und flugzeuggetragenen Verfahren eine Hauptrolle. Hierzu werden zum Teil neuartige Sensoren und Sensorkombinationen eingesetzt. Häufig werden auch nicht direkt Schwerefeldgrößen beobachtet, sondern die Auswirkungen des Erdschwerefeldes und dessen räumlicher und zeitlicher Variationen auf abgeleitete Größen. Hier sind zum Beispiel die Satellitenbahnen und die Satellitenaltimetrie zu nennen. Zukünftig werden unter Umständen auch völlig neuartige Sensortechnologien, wie zum Beispiel Kombinationen von Satellitenmissionen und Sensoren sowie optische Uhren als Beobachtungssystem für das Erdschwerefeld eine Rolle spielen.

Zu diesem Thema werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Charakterisierung satellitengetragener Schwerefeldsensoren (Signal-, Fehlerverhalten und Kalibration von Beschleunigungsmessern und SST sowie von Satellitenaltimetrie)
- Analyse von Schwerefeldbeobachtungen mit flugzeuggestützten Verfahren (Fluggravimetrie, inertielle Messplattform) – siehe FB5
- Durchführung von terrestrischen gravimetrischen Messkampagnen (Eichung, Alpengletscher, Hydrologie)
- Budgetierung von Sensor- und Fehlerverhalten zukünftiger Schwerefeldsensoren (Techniken zur Sensoranalyse, Konzeptstudien)
- Analyse von Satellitenzeitreihen zur Ableitung von instrumenten- und satellitenspezifischen Eigenschaften und Wechselwirkungen mit der Atmosphäre

### (2) Simulationsprozesse

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

Zu diesem Thema werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Anwendung und Weiterentwicklung des semi-analytischen Missionssimulators (Analyse von Missionsvorschlägen, Erweiterung des Simulators)
- Weiterentwicklung des Closed-Loop-Missionssimulators (Analyse unterschiedlicher Sensorcharakteristiken, Erweiterung des Simulators hinsichtlich Beobachtungstypen und Parallelisierung zur Effizienzsteigerung, Analyse von Satellitenformationen zur Reduktion von zeitlichem und räumlichem Aliasing)
- Aufbau einer realistischen Simulationsumgebung (hinsichtlich Orbit und Schwerefeld) von SST-Missionen und Formationen
- Simulationsstudien zur Nutzung von Zusatzinformationen zur Bestimmung des statischen und zeitvariablen Erdschwerefeldes (Satellitenaltimetrie, flugzeuggestützte und terrestrische Sensoren)

### **(3) Theorie und Aufbereitung der Beobachtungen**

Um die Schwerefeldbeobachtungen in einem Auswertemodell nutzen zu können, müssen diese in vielen Fällen zunächst konsistent aufbereitet und zum Teil reduziert werden. Um die heute erzielbaren Messgenauigkeiten auch in der Modellierung adäquat nutzen zu können, ist es notwendig, entsprechende Genauigkeiten auch in der Aufbereitung der Beobachtungen zu gewährleisten. Hierzu sind in einigen Fällen auch Verbesserungen im theoretischen Fundament sowie in der Numerik notwendig. Die aus terrestrischen Messungen, mit Flugzeugen und/oder aus der Satellitenaltimetrie gewonnene Schwerefeldinformation soll hinsichtlich Bezugsfläche und notwendigen Reduktionen charakterisiert werden, um diese in einem gemeinsamen Modellierungsansatz verwenden zu können. Besonderes Augenmerk soll auf eine konsistente Verarbeitung geometrischer und physikalischer Größen zur Beschreibung des Erdsystems gelegt werden, um diese später in einem gemeinsamen Ansatz analysieren zu können. In den Satellitenverfahren sind mit Ausnahme der Gradiometrie die Bahnen Träger der Schwerefeldinformation. Aus den Bahnstörungen bzw. der Messung der Bahnstörungen durch SST-Verfahren können mit bestimmten Verfahren direkte Schwerefeldfunktionale abgeleitet werden. Bei der Gradiometrie hingegen werden mit Hilfe von Beschleunigungsmessern und anderweitigen Sensoren punktweise Schweregradienten beobachtet. Im Falle der GOCE-Gradienten ist die Verwendung als Punktbeobachtung jedoch aufgrund des farbigen Fehlerverhaltens nur bedingt möglich. An Methoden zur Filterung bzw. Veredelung von GOCE-Gradienten durch GRACE-Information mittels Kollokationsansätzen soll weiter gearbeitet werden.

Zu diesem Thema werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Bestimmung und Nutzung altimetrisch abgeleiteter Schwerefeldinformation (altimetrisch abgeleitete Schweregradienten, Einfluss der MDT, Charakterisierung verfügbarer externer Datensätze)
- Aufbereitung von GOCE-Rohmessungen zu Schwerefeldgradienten (Level-1B-Prozessierungskette, Vorverarbeitung und Analyse der GOCE-Gradienten, alternative Ansätze)
- Ergänzung der GOCE-Gradienten mit anderweitig bestimmten Schweregradienten aus globalen Modellen und Altimetrie (Gradienten in verschiedenen Bezugsrahmen)
- Untersuchung der Sensitivität einzelner Tensorelemente auf das Erdschwerefeld
- Entwicklung und Verwendung gemeinsamer Standards zur Aufbereitung der Beobachtungen (Standards – siehe FB4, systematische Fehler)

### **(4) Regionale und globale Modellbildung**

Zur Modellierung des regionalen, globalen und zeitlich variablen Erdschwerefeldes steht eine Vielzahl von Techniken und Methoden zur Verfügung. Hauptunterschied zwischen den Ansätzen sind die im mathematischen Modell verwendeten Basisfunktionen. Hier muss zwischen den regionalen und globalen Ansätzen unterschieden werden, d.h. es muss untersucht werden, in welchen Fällen bestimmte Methoden auf Grund ihrer Eigenschaften jeweils vorteilhaft eingesetzt werden können. Ein wichtiger Aspekt in der Modellierung des zeitvariablen Anteils liegt in der Strategie, welche Signale in der Modellierung bereits eliminiert werden, welche im Signal erhalten bleiben und wie zeitvariable Anteile im Auswertemodell parametrisiert werden. Ein weiteres Themenfeld ist die Berechnung globaler hochauflösender Kombinationsmodelle. Neben der Aufbereitung terrestrischer Realdaten sind hier die stochastische Modellierung sowie die optimale relative Gewichtung von entscheidender Bedeutung. Schließlich müssen die Genauigkeiten der globalen und regionalen Modelle durch Vergleich mit unabhängigen Messungen überprüft werden. Hier spielt das grundsätzliche Problem der Vergleichbarkeit von spektral begrenzten Signalen mit punktuellen Beobachtungen eine Rolle.



Zu diesem Thema werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Weiterentwicklung und Anwendung der implementierten Ansätze zur globalen und regionalen Schwerefeldmodellierung (semi-analytisch, time-wise, Multiskalen, Kollokation nach kleinsten Quadraten, Bahnstörungen)
- Untersuchung von alternativen Ansätzen und optimaler stochastischer Modellierung von GOCE-Schwerefeldlösungen
- Untersuchungen zu Methoden der Ableitung von Schwerefeldinformation aus SST-Beobachtungen (Integralansatz, Beschleunigungsansatz, Energiebilanz)
- Untersuchungen zur Behandlung des zeitvariablen Schwerefeldes in der Analyse (Reduktion durch De-Aliasing, Parametrisierung des zeitvariablen Anteils)
- Untersuchung systematischer Effekte in den niedrigen Graden globaler Schwerefeldmodelle im Wechselspiel von Orbitbestimmung, Schwerefeldmodellierung, Standards und Hintergrundmodellen
- Gemeinsame Verarbeitung von Schwerefeldbeobachtungen (globale Kombinationsmodelle, regionale Kombination, Parametrisierung)
- Entwicklung von Techniken zur Verarbeitung und Inversion großer Gleichungssysteme
- Weiterentwicklung von Methoden zur Ermittlung der äußeren Genauigkeit von Schwerefeldlösungen und deren Anwendung (Validierung)
- Entwicklung eines Konzeptes zur gemeinsamen Modellbildung von Geometrie und Schwerefeld (zusammen mit FB1 und FB4)

#### **(5) Anwendungsstrategien**

Für ausgewählte Anwendungsgebiete sollen entsprechende Strategien zur Nutzung der regionalen und globalen Schwerefeldmodelle entwickelt werden. Es soll geklärt werden, wo die Potenziale zur Nutzung dieser Schwerefeldmodelle in verschiedenen Anwendungsbereichen liegen. Diese Strategien sollen in enger Kooperation mit externen Partnern sowie dem FB3 geschehen. Der Fokus dieser Arbeiten soll ausdrücklich durch Einbringen von Expertise aus dem Bereich Schwerefeld in die Arbeiten der externen Partner liegen.

Zu diesem Thema werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Einfluss verbesserter Schwerefeldinformation auf die Bestimmung des stationären Anteils der Ozeanzirkulation (MDT) inklusive konsistente Kovarianzfortpflanzung zur MDT-Fehlerbeschreibung
- Festlegung eines globalen Höhensystems
- Geophysikalische Nutzung der Schwerefeldinformation für Lithosphärenmodellierung
- Nutzung von Schwerefeldinformation im Bereich von Eisschilden, u.a. unter Einbeziehung von Cryosat
- Definition von Anforderungen für zukünftige Schwerefeldmissionen aus Sicht der Anwendungen
- Gemeinsame Nutzung geometrischer und gravimetrischer Information (GNSS, SAR, Altimetrie) zur Detektion von Deformations- und Massensignalen, mit Anwendungen in Hydrologie, Eis, Ozean, feste Erde (gemeinsam mit FB 1 und FB3)

## Forschungsbereich 3: Geodätische Erdsystemmodellierung

### Motivation und Zielsetzung

Das allgemeine Ziel des FB3 ist eine Verbesserung des Verständnisses von dynamischen Prozessen sowie deren Wechselwirkungen im Erdsystem auf der Grundlage geodätischer Beobachtungen. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Erstellung und Verbesserung geeigneter Modelle, die die dynamischen Prozesse in den betrachteten Systemkomponenten möglichst gut abbilden sollen. Die stark interdisziplinär ausgerichteten Arbeiten dieses FB beziehen neben geodätischen Beobachtungs- und Modelldaten auch komplementäre Daten, d.h. Beobachtungen und Modellergebnisse benachbarter wissenschaftlicher Disziplinen, mit ein (z.B. Geophysik, Meteorologie, Ozeanographie, Hydrologie, Glaziologie). So lassen sich umfangreiche Informationen über dynamische Prozesse im Erdsystem erhalten, die insbesondere für die Erforschung globaler Umweltveränderungen von höchster Bedeutung sind. Die Ergebnisse sollen anderen wissenschaftlichen Disziplinen und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, um einen fundierten Beitrag zur aktuellen Diskussion zum Globalen Wandel zu liefern.

Durch die im FB1 und im FB2 bearbeiteten und auf eine globale Sichtweise ausgerichteten geometrischen und gravimetrischen Raumbesobachtungen werden wesentliche und alleinstellende integrale Informationen zu unterschiedlichen Bilanzen im System Erde gewonnen. Im FB3 sollen spezifische Prozesse innerhalb von Erdsystemkomponenten und zwischen einzelnen Systemkomponenten untersucht werden, um die gemessenen integralen Signale so weit wie möglich in Beiträge einzelner Abläufe aufzuspalten (Signaltrennung), die Genauigkeit einzelner Prozessparameter zu beurteilen und die Bilanzen so gut wie möglich zu schließen.

Wesentliche Forschungsthemen sind die Erstellung bzw. Verbesserung von Modellen unterschiedlicher Teilbereiche des Erdsystems, die Ermittlung der theoretischen Zusammenhänge zwischen heterogenen Beobachtungstypen und Modellparametern, Untersuchungen zur numerischen Implementierung einschließlich der Bewertung verschiedener Schätzverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Modellinversion sowie die Prädiktion modellierter Prozesse auf unterschiedlichen Zeitskalen.

### Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

Mittels geometrischer und gravimetrischer Messungen erfasst die Geodäsie die Oberflächengeometrie, das Schwerfeld und die Rotation der Erde einschließlich ihrer Orientierung im Welt- raum sowie weitere physikalische Parameter des Erdsystems (z.B. der Troposphäre und Ionosphäre). Durch eine lange Beobachtungshistorie und immer genauere Raumbesobachtungsverfahren stellt die Geodäsie eine hervorragende (und im Gegensatz zu vielen anderen Geowissenschaften) globale Datenbasis für die Feststellung von Langzeitveränderungen im Erdsystem bereit. Dadurch leisten die Beobachtungen einen fundamentalen Beitrag zum Verständnis von langfristigen und großskaligen Vorgängen und Änderungen. Als Beispiele seien die Veränderung der Oberflächengeometrie von Erdkruste und Meeresspiegel, die Veränderung ozeanischer und kontinentaler Eismassen sowie die Veränderung des globalen Wasserkreislaufs und der kontinentalen Hydrologie genannt, die durch Umweltveränderungen und anthropogene Einflüsse hervorgerufen werden.



Zur qualitativen und quantitativen Beschreibung von Zusammenhängen im Erdsystem werden in der Geodäsie mathematische (empirische) und physikalische (dynamische) Modelle entwickelt und genutzt. Modelle bilden das Fundament der Analyse von geodätischen Beobachtungsdaten im Hinblick auf Erdsystemprozesse. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen Messwerten und physikalisch interpretierbaren Parametern. Um unerwünschte Signalanteile aus Beobachtungen zu reduzieren und um integrale Signale in einzelne Bestandteile zu zerlegen, werden auch Modelle anderer Geowissenschaften genutzt. Mittels der hochgenauen Beobachtungen auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen liefert die Geodäsie eine wichtige Datengrundlage für die Qualitätsüberprüfung und Verbesserung derartiger Modelle.

Seit vielen Jahren werden in der Geodäsie inverse Methoden zur Erstellung empirischer Modelle von Transport- und Austauschprozessen insbesondere von Masse innerhalb und zwischen individuellen Systemkomponenten entwickelt. In vielen Studien wurde die zeitvariable Massenverteilung im Erdsystem, insbesondere im Bereich der kontinentalen Hydrologie und der Kryosphäre, aus der Inversion von GRACE-Schwerefeldlösungen (Ramillien et al. 2005), von Oberflächen deformationen aus GPS-Zeitreihen oder einer Kombination beider Verfahren (Kusche and Schrama 2005) untersucht. Weitere Beispiele sind hochgenaue Gezeitenmodelle aus Multi-Missions-Altimetrie (Savcenko und Bosch 2008). Bislang gibt es kaum Entwicklungen für die Nutzung von Erdrotationsparametern (Polbewegung, Variation der Tageslänge, UT1) für entsprechende Inversionen. Die meisten Ansätze zur geophysikalischen Interpretation der beobachteten Erdrotationsvariationen basieren derzeit auf Vorwärtsmodellen, mit denen Drehimpulsvariationen innerhalb der Subsysteme und Drehimpulsaustauschprozesse zwischen den Systemkomponenten beschrieben und bilanziert werden (Gross et al. 2003).

Aufgrund des großräumigen oder globalen Charakters des überwiegenden Teils der im CGE berechneten und analysierten geodätischen Parameterzeitreihen liefert das CGE hauptsächlich Informationen zu jenem Teilbereich der Komponenten des Erdsystems, in dem Prozesse auf großen räumlichen Skalen ablaufen. Darüber hinaus ist der vom CGE bearbeitete Ausschnitt des Erdsystems zeitlich und thematisch begrenzt. Die Mehrzahl der aktuellen erdsystembezogenen Projekte des CGE hat die Modellierung individueller Prozesse in einzelnen Systemkomponenten zum Ziel, die eine unmittelbare Auswirkung auf die Variation bestimmter geodätischer Parameter haben und sich somit entweder direkt beobachten lassen oder durch eine Kombination heterogener Beobachtungen unterschiedlicher Verfahren und Modelldaten ermittelt werden können. Die aktuellen Arbeiten im Bereich der festen Erde sind die Modellierung der Lithosphärendynamik mit geometrischen Raumbenutzungsverfahren (Drewes 2008), die Modellierung der Oberflächen deformation der Erde durch Auflasten, Gezeiten und Variationen der Erdrotation sowie die verbesserte Bestimmung der Elastizitätseigenschaften der Erdkruste aus vertikalen Bewegungen global verteilter GPS-Stationen. Im Bereich der Atmosphäre liegen die Schwerpunkte auf der Modellierung von Troposphärenparametern und des Elektronengehalts bzw. der Elektronendichte der Ionosphäre (Krügel et al. 2007, Schmidt et al. 2008a). Im Bereich der Ozeanosphäre werden insbesondere die Kinematik und Veränderung des Meeresspiegels (Marcos et al. 2007), die Ozeanströmungen und ihre zeitlichen Veränderungen, ozeanische Massenvariationen und Ozeangezeiten aus kombinierten Beobachtungen der Altimetrie und der Satellitenschwerefeldmissionen GRACE und GOCE sowie aus Ozeanmodellen ermittelt (Savcenko und Bosch 2008). Untersuchungen zur kontinentalen Hydrosphäre erstreckten sich auf die Modellierung regionaler und globaler Frischwasserflüsse und Wassermassenbilanzen aus Variationen des Erdschwerefelds sowie die Trennung integraler Wasserspeichervariationen in die Beiträge einzelner Speicherkomponenten über Multi-Sensor-Ansätze (Schmidt et al. 2008b, Seitz et al. 2008). Im Bereich der Kryosphäre liegen die Schwerpunkte auf der Erforschung von Eismassenbilanzen in polaren Regionen (Horwath und Dietrich 2009, Rummel et al. 2011b).

Neben der Beobachtung und Modellierung individueller Prozesse und Veränderungen im Erdsystem werden im CGE komplexe dynamische Erdsystemmodelle entwickelt, die eine Vielzahl von Abläufen innerhalb und zwischen unterschiedlichen Systemkomponenten konsistent beschreiben (Seitz 2004). Mit derartigen Modellen vorwärts berechnete Drehimpuls-, Massen- und Energieaustauschprozesse werden mit entsprechenden aus integralen geodätischen Beobachtungszeitreihen der Erdrotationsparameter, der Schwerefeldkoeffizienten und der Oberflächendeformation abgeleiteten Größen bilanziert. Aus Langzeitsimulationen mit Vorwärtsmodellen werden Zukunftsprognosen für die Entwicklung der geodätischen Parameterzeitreihen erstellt (Seitz und Drewes 2009). Durch Inversion eines Erdsystemmodells werden ungenau bekannte physikalische Parameter des Erdsystems (z.B. Love-Zahlen) aus den geodätischen Parameterzeitreihen geschätzt. Hierzu werden umfangreiche Studien zur Eignung unterschiedlicher Schätzverfahren durchgeführt.

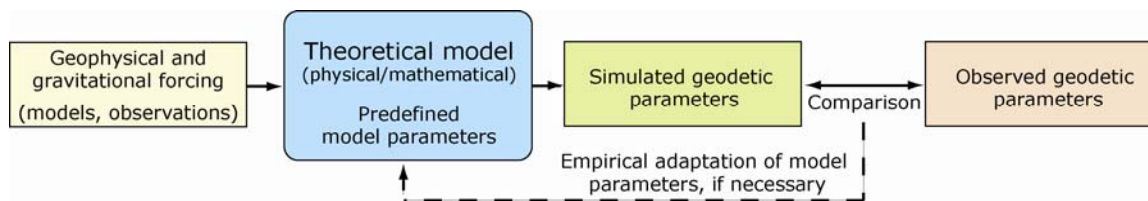
## Programm und Themen

Das Arbeitsprogramm des FB3 orientiert sich an den Zielen,

- (a) ein verbessertes Verständnis dynamischer Prozesse innerhalb und zwischen einzelnen Komponenten des Erdsystems zu erreichen,
- (b) das verbesserte Verständnis zu nutzen, um Abläufe mit möglichst genauen Modellen zu beschreiben,
- (c) langfristige Veränderungen der Prozesse zu prognostizieren und damit verbundene Auswirkungen auf die Umwelt zu erforschen sowie
- (d) die Forschungsergebnisse anderen Disziplinen der Wissenschaft und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen und einen verlässlichen Beitrag zur aktuellen Diskussion zum Globalen Wandel zu liefern.

Zusätzlich zu den in FB1 und FB2 erzeugten Parameterzeitreihen sollen in interdisziplinärer Zusammenarbeit auch komplementäre Beobachtungs- und Modelldaten anderer Natur- und Geowissenschaften mit in die Analysen einbezogen werden. Umgekehrt sollen die Forschungsergebnisse des CGE mit dem Ziel der Verbesserung externer Modelle rückgekoppelt werden. Bestehende Kooperationen mit anderen Institutionen in der Geodäsie und benachbarter Disziplinen sind zu pflegen und auszubauen sowie neue Kontakte zu erschließen.

Angestrebt wird eine anwendungsbezogene, möglichst realistische Modellierung der für die Geodäsie wichtigsten Komponenten des Erdsystems. Durch die Integration von heterogenen Beobachtungen und Modellergebnissen sollen dynamische Prozesse und Wechselwirkungen innerhalb und zwischen einzelnen Systemkomponenten erforscht, soweit wie möglich in Teilprozesse zerlegt und in theoretischen und numerischen Modellen abgebildet werden. Es sollen sowohl Vorwärtsmodelle für geodätische Parameter als auch inverse Modelle zur Schätzung von Zustandsgrößen und/oder Parametern des Erdsystems (weiter-)entwickelt werden. Während die inverse Modellierung vor allem das Ziel verfolgt, die Dynamik einzelner Prozesse so gut wie möglich unter Einbeziehung möglichst aller relevanten Beobachtungsdaten zu ermitteln, bedeutet die Vorwärtsmodellierung die Kombination der Teilmodelle bzw. einzelner Prozesse zu einem möglichst umfassenden Erdsystemmodell, mit dem das Zusammenwirken der Subsysteme untersucht und mit den integralen geodätischen Beobachtungen bilanziert werden kann. Die Entwicklung aussagefähiger und verlässlicher Vorwärtsmodelle ist eine wichtige Grundvoraussetzung für die vom CGE angestrebte Prädiktion von langfristigen natürlichen oder anthropogenen Veränderungen im Erdsystem und den damit verbundenen Auswirkungen auf Umwelt und Lebensbedingungen. Durch die Analyse der geodätischen Beobachtungen in Kombination mit Ergebnissen benachbarter Disziplinen im Hinblick auf Erdsystemprozesse und deren langfristige

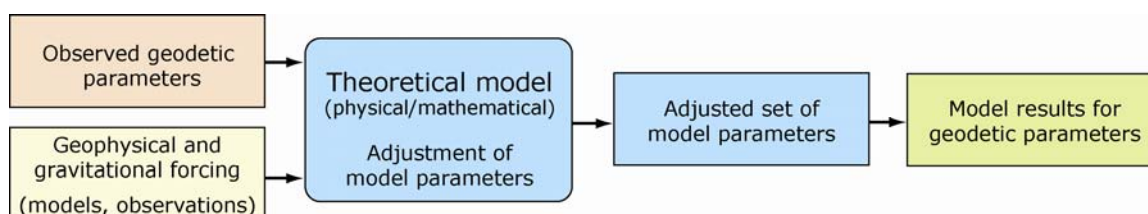


**Abbildung 9:** Schematische Darstellung eines Vorwärtsmodells.

Veränderungen liefern die Arbeiten des FB3 auch einen unmittelbaren Beitrag zum Globalen Geodätischen Beobachtungssystem GGOS.

In Vorwärtsmodellen dienen die beobachteten Zeitreihen als Eingangsgrößen von Bilanzgleichungen, die den integralen Effekt der im Erdsystem ablaufenden Austauschprozesse von Drehimpuls und Masse mit hoher Genauigkeit beschreiben (Abbildung 9). Um die Bilanzen besser als bisher zu schließen, sind die Vorwärtsmodelle auf Konsistenz zu prüfen und um weitere bislang nicht oder unzureichend berücksichtigte Systemkomponenten zu ergänzen. Unzureichend genau bekannte Drehimpuls- und Massenvariationen sollen auch über inverse Methoden aus Beobachtungen berechnet, mit externen Daten verglichen und als Antriebe in Vorwärtsmodelle eingeführt werden. In Sensitivitätsanalysen sollen kritische Modellparameter, die großen Einfluss auf die Ergebnisse haben, aber unzureichend genau bekannt sind, aufgedeckt und durch geeignete Schätzverfahren verbessert werden.

Einen Schwerpunkt der Arbeiten des FB3 bildet die inverse physikalische Modellierung (Abbildung 10). Dabei sollen Parameter und Zustandsgrößen des Erdsystems unter Einsatz geeigneter Schätzverfahren aus unterschiedlichen Messungen bestimmt werden (Multi-Sensor-Analysen). Eine geeignete Kombination der Beobachtungen mehrerer Verfahren erlaubt oftmals auch die Trennung integraler Signale in die Beiträge einzelner Komponenten. Die Arbeiten zur inversen Modellierung sollen verstärkt in interdisziplinärer Zusammenarbeit erfolgen. Neben der Pflege bestehender und der Erschließung neuer Kontakte zu anderen nationalen und internationalen Institutionen wird langfristig auch eine verstärkt interdisziplinäre Zusammensetzung der Arbeitsgruppe innerhalb des CGE angestrebt. Weitere Forschungsaufgaben im Zusammenhang mit der inversen Modellierung sind Untersuchungen zur numerischen Implementierung von Modellen und Algorithmen sowie die Bewertung verschiedener Schätzverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Modellinversion. Die letztgenannten Aufgaben sollen in enger Abstimmung mit FB4 erfolgen. Ein wichtiges Potenzial der Geodäsie ist die Qualitäts- und Genauigkeitsabschätzung von Beobachtungen und die Fortpflanzung von Messfehlern und -unsicherheiten auf geschätzte Parameter und Zustandsgrößen. Auf diese Weise ermöglicht die inverse Modellierung verlässliche Aussagen über die Genauigkeit der berechneten Größen. Durch den Vergleich der Ergebnisse mit bestehenden numerischen Modellen der Subsysteme (z.B. Atmosphären-, Ozean- und Hydrologiemodelle) kann deren Qualität beurteilt sowie der Beitrag nicht modellierter Systemkomponenten zu unterschiedlichen Bilanzen quantifiziert werden.



**Abbildung 10:** Schematische Darstellung eines inversen Modells.

Die Ergebnisse des FB3 sollen direkt in die anderen Forschungsbereiche rückgekoppelt werden. So sollen für FB1 und FB2 verbesserte Modelle für die Auswertung der geodätischen Beobachtungen bereitgestellt werden (z.B. für die Modellierung der Troposphäre, Ionosphäre, Auflastdeformation usw.). Die Qualitätsabschätzung der Ergebnisse und die Bilanzierung der verbesserten Modelle für einzelne Prozesse mit den integralen Beobachtungen erlaubt die Identifikation von Lücken in der Gesamtbilanz. Daraus sollen langfristig Defizite im Beobachtungssystem abgeleitet und im FB5 Vorschläge für ergänzende bzw. neue Sensoren oder Missionen erarbeitet werden.

Im Einzelnen sind die folgenden Forschungsthemen zu bearbeiten.

### **(1) Multi-Sensor Analysen**

Die gemeinsame Nutzung unterschiedlicher Raum- und In-situ-Beobachtungsverfahren für die Erforschung des Systems Erde ist ein zentrales Thema des FB3. Im Fokus der Arbeiten steht die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den Beobachtungen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen sowie statischen und zeitlich variablen Parametern und Zustandsgrößen des Erdsystems bzw. seiner Teilkomponenten. Letztere stellen unbekannte Parameter geeigneter funktionaler Modelle dar (inverse Modellierung). Die integrierte Auswertung von Beobachtungen unterschiedlicher Verfahren (Multi-Sensor-Ansätze) ermöglicht auch eine Aufspaltung integraler geodätischer Zeitreihen in die Beiträge einzelner Prozesse. Durch Multi-Sensor-Analysen sollen die Schwächen einzelner Sensoren (z.B. unzureichende Abtastraten) behoben, das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert und bisher bestehende Schranken der Modellierung überwunden werden. Die Arbeiten zur inversen Modellierung sollen stärker als bisher in interdisziplinärer Zusammenarbeit erfolgen und auch Beobachtungsdaten anderer Geowissenschaften einbeziehen. Ein wesentliches Ziel dieses Forschungsthemas ist die Verbesserung des Verständnisses von Abläufen und Wechselwirkungen im Erdsystem, das insbesondere im Hinblick auf den Globalen Wandel von großer Bedeutung ist.

### **(2) Erdsystemmodelle**

Die geodätischen Zeitreihen der Erdrotationsschwankungen und Schwerefeldvariationen stellen wichtige integrale Größen dar, die für die Aufstellung von komponentenübergreifenden Bilanzen (v.a. von Drehimpuls und Masse) genutzt werden können. Mit physikalischen Erdsystemmodellen sollen dynamische Prozesse, die innerhalb und zwischen individuellen Komponenten des Erdsystems ablaufen, beschrieben und numerisch simuliert werden (Vorwärtsmodellierung). Um die Bilanzen bestmöglich zu schließen, sind bestehende Modelle und verwendete Eingangsdaten (z.B. atmosphärische Massenverteilungen, Massenbewegungen oder Druckvariationen) auf Konsistenz zu prüfen, und die Modelle um bislang nicht oder unzureichend berücksichtigte Systemkomponenten zu ergänzen. Informationen zu Prozessen (z.B. Transport- und Austauschprozesse) und Wechselwirkungen in unterschiedlichen Erdsystemkomponenten sollen auch über inverse Methoden aus Beobachtungen geodätischer und anderer Messverfahren berechnet, mit externen Modell- und Beobachtungsdaten verglichen und in Vorwärtsmodelle eingeführt werden. Daneben sind auch die in den physikalischen Modellen enthaltenen mathematischen Algorithmen, physikalischen Transferfunktionen und Parameter bezüglich ihrer Genauigkeiten und Konsistenz zu untersuchen und ggf. zu verbessern. Die angestrebte Prädiktion von Parametern und Prozessen mit physikalischen Modellen auf unterschiedlichen Zeitskalen erfordert zudem eine Untersuchung der Modelle im Hinblick auf ihre Vorhersagefähigkeit (numerische Stabilität der Algorithmen, Genauigkeit der Anfangsbedingungen und Antriebe, Fehlerfortpflanzung usw.).

### (3) Atmosphäre

Die Atmosphäre kann hinsichtlich ihrer elektrischen Ladung in Neutralatmosphäre und Ionosphäre unterteilt werden, wobei erstere auch die Troposphäre enthält. Beide Schichten beeinflussen die Laufzeiten elektromagnetischer Signale und sind bei der Auswertung geodätischer Raubeobachtungen zu berücksichtigen. Andererseits können aus der Kombination verschiedener Raumverfahren sowohl Troposphären- als auch Ionosphärenparameter abgeleitet werden. Die daraus resultierenden verbesserten Atmosphärenmodelle werden einerseits zur Korrektur von Messsignalen verwendet, andererseits stellen sie wertvolle Informationen für Nachbardisziplinen wie die Atmosphärenphysik und die Meteorologie dar. Allgemein kann zwischen physikalischen, empirischen und mathematisch-physikalischen Atmosphärenmodellen unterschieden werden. Während erstere auf den physikalischen Grundgleichungen, wie z.B. den Maxwell-Gleichungen, basieren, verwenden empirische Modelle hauptsächlich mathematische Funktionen. Schwerpunkt der Arbeiten ist die Entwicklung mathematisch-physikalischer Modelle, beispielsweise durch die Einführung physikalisch motivierter Funktionen wie der Chapman-Funktion zur Beschreibung eines vertikalen Elektrodichteprofiles innerhalb der Ionosphäre.

### (4) Hydrosphäre

Die Hydrosphäre untergliedert sich in die Ozeane und die kontinentale Hydrosphäre. Die Arbeiten zu diesem Forschungsthema verfolgen das Ziel, dynamische Prozesse in diesen beiden Komponenten des Erdsystems möglichst gut über Beobachtungen zu erfassen und mit Modellen zu beschreiben. Zentral sind insbesondere Transport- und Austauschprozesse von Masse und Drehimpuls. Im Bereich der Ozeane stehen die Bestimmung des 4D-Feldes der Oberflächenströmungen, der Geometrie und Kinematik des Meeresspiegels auf unterschiedlichen Zeitskalen sowie ozeanischer Massentransportprozesse und Meereszeiten im Mittelpunkt. Hierzu sollen insbesondere die Arbeiten zur Satellitenaltimetrie fortgeführt und weiterentwickelt werden. Schwerpunkte der Arbeiten zur kontinentalen Hydrosphäre sind die Analyse von Variationen der Wasserspeicherung und deren weitgehende Trennung in die Beiträge einzelner hydrologischer Speicherkomponenten mit dem Ziel der Verbesserung bestehender hydrologischer Modelle.

### (5) Kryosphäre

Die Kryosphäre umfasst die eisbedeckten Bereiche der Erde, insbesondere die großen polnahen Eisschilde in Grönland und der Antarktis, sowie kontinentale Gletscher etwa in Alaska, Südamerika, dem Himalaya oder in Zentralasien. Die Kryosphäre hat einen großen Einfluss auf das globale Klima u.a. durch ihr Vermögen, große Wassermassen langfristig zu speichern und als Puffer im Wasserkreislauf zu dienen. Gerade in den gletschernahen Gebirgsregionen spielt die Kryosphäre eine bedeutende Rolle in der Wasser- und Energieversorgung. Veränderungen der Kryosphäre, also das Abschmelzen oder Anwachsen von Eisschilden und Gletschern, lassen sich einerseits durch Ausmessung der Oberflächen bestimmen (terrestrisch, flugzeuggestützt oder mittels Satellitenaltimetrie und -fernerkundung – punktuell auch durch GNSS), andererseits durch die aufgrund von Massenveränderungen hervorgerufenen Schwerefeldänderungen (lokal durch terrestrische Vermessungen, im großskaligen Bereich durch Satellitenmissionen). Möglichkeiten der Kombination komplementärer Techniken unter Einbeziehung neuer geometrischer Sensoren (z.B. von CryoSat-2, TerraSAR-X) sind gründlich zu erschließen. Prozesse in der Kryosphäre stehen in direkter Verbindung zu anderen Komponenten des Erdsystems, nämlich der festen Erde (zeitvariable Auflasteffekte einschließlich deren Rückkopplung auf das Schwerefeld) und der Hydrosphäre (Anstieg des Meeresspiegels, Veränderung von Ozeanströmungen durch veränderten Frischwassereintrag). Die Aufgabe besteht im Erstellen konsistenter Ergebnisse aus verschiedenen geomet-

rischen und gravimetrischen Verfahren mit dem Ziel einer langfristigen Überwachung der Kryosphäre und der Integration dieser Ergebnisse in dynamische Modelle.

#### **(6) Feste Erde**

Verschiedene fundamentale physikalische Parameter der festen Erde (z.B. Love-Zahlen, Hauptträgheitsmomente des Erdmantels, Orientierung der Hauptträgheitsachsen, Eigenschwingungen, etc.) lassen sich aus konsistent geschätzten Variationen der Erdrotation und der Schwerefeldkoeffizienten zweiten Grades über die Inversion der Drehimpulsbilanzgleichung im Erdsystem berechnen. Eigenschwingungen der Erde werden beispielsweise durch Erdbeben angeregt. Tangentiale Bewegungen können dabei durch vertikale Pendel gemessen werden. Zu diesem Zweck betreibt das DGFI ein 30-Meter-Pendel im Salzbergwerk Berchtesgaden. Die aus der Auswertung der geometrischen Beobachtungsverfahren (FB1) resultierenden Zeitreihen von Deformationen der Erdkruste sollen im Hinblick auf elastische Auflasteffekte, tektonische Vorgänge, Gezeiteneffekte und glazial-isostatische Ausgleichsprozesse analysiert werden.



## Forschungsbereich 4: Methodische Grundlagen

### Motivation und Zielsetzung

Dieser Forschungsbereich versteht sich als Querschnittsaufgabe. Durch die Erarbeitung und Bereitstellung von methodischen Grundlagen und Analyseverfahren soll eine übergreifende Infrastruktur geschaffen werden, die schnell zu gesicherten Ergebnissen führt und damit fundierte Entscheidungen in der Forschungs- und Entwicklungsarbeit zulässt. „Methodische Grundlagen“ ist ein Fokus, der bisher in keiner der beteiligten Forschergruppen eigenständig bearbeitet wurde. Methodische Grundlagen zu schaffen ist keineswegs trivial und erfordert oft neue Denksätze, die sich nicht unmittelbar aus Projektzielen ableiten. Durch die Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen aus verschiedenen Instituten sollen hier Aufgaben gebündelt werden, die Grundlagen schaffen, welche in allen Forschungsbereichen Verwendung finden. Damit werden die Institute intensiver verknüpft, Doppelarbeiten werden vermieden und die Effizienz wird erhöht. Dies sind allerdings Langfristaufgaben, die innerhalb des ersten Programmzeitraums des CGE nur begonnen werden können.

In diesem Forschungsbereich ist ein vertieftes Verständnis von präzisen Messungen zu entwickeln, deren räumliches und zeitliches Auflösungsvermögen zu klären und die Sensitivität der Beobachtungsverfahren für bestimmte Zielparameter zu untersuchen. Generische Algorithmen müssen entwickelt, numerisch effizient umgesetzt, getestet, dokumentiert und verwaltet werden. Von besonderem Interesse sind Verfahren zur kombinierten Auswertung verschiedener Raumverfahren, zur Analyse und Synthese mit dedizierten Funktionensystemen und zur Modellierung zeitvariabler physikalischer Prozesse im System Erde. Es ist dabei zu prüfen, ob die verwendeten Daten konsistent sind, d.h. auf den gleichen Modellannahmen bzw. Grundvoraussetzungen beruhen. Die Erfassung, Archivierung und Annotation von Daten soll nach einheitlichen Grundsätzen und international anerkannten Regeln erfolgen.

Auch durch die extrem hohen Genauigkeiten von satellitengestützten geodätischen Raumverfahren steigen die Anforderungen für Analyse- und Auswerteverfahren ständig. Die bisherigen Auswertemethoden sind deshalb grundsätzlich zu hinterfragen, die Gültigkeit ihrer Annahmen ist zu überprüfen und Werkzeuge sind zu entwickeln, durch die Defizite in der Modellierung identifiziert und Empfehlungen für eine bessere Parametrisierung abgeleitet werden können. Simulationen spielen dafür eine besondere Rolle und helfen, für neue Messsysteme und Auswerteverfahren optimale Lösungsansätze zu entwickeln.

Der FB4 soll Anregungen für die Entwicklung neuer methodischer Grundlagen aus anderen Forschungsbereichen entgegennehmen oder selbst Entwicklungen aufgreifen, deren Anwendung von allgemeiner Bedeutung ist. Projekte, die hauptsächlich anderen Bereichen zugeordnet sind, können Teilaufgaben zur Methodikentwicklung definieren, die unter der Koordinierung und mit den Arbeitstechniken des FB4 zu bearbeiten sind. Neue Methoden müssen ausreichend dokumentiert und die Nutzung in anderen Bereichen durch einen einfachen Zugang, durch Musterlösungen oder Anpassungen an die speziellen Bedürfnisse eines konkreten Projektes sichergestellt werden.

Die Erarbeitung methodischer Grundlagen und die Entwicklung neuer Analyseverfahren sollen dabei nach einheitlichen Grundsätzen erfolgen. Dazu sind Regeln aufzustellen und anzuwenden, z.B. für das Design und die Versionierung von Software, deren Dokumentation und die zugehörigen Testszenarien. Sicherung, Dokumentation und langfristige Speicherung von Primärdaten



müssen gerade in den Geowissenschaften beachtet werden, um möglichst lange Beobachtungsreihen mit reproduzierbaren geodätischen Bezugssystemen für gesicherte Erkenntnisse im Bereich des Globalen Wandels bereitzustellen. Die sachgerechte Nutzung von Daten ist durch Definition und Erfassung von Metadaten sicherzustellen. Dabei sind international anerkannte Standards zu beachten und anerkannte Regeln wissenschaftlicher Praxis einzuhalten, z.B. die digitale Registrierung von Datensätzen, die als Grundlagen wissenschaftlicher Veröffentlichungen dienen (Allianz der Deutschen Wissenschaftsorganisationen 2010). Der offene Umgang mit Daten, Algorithmen und Programmen schafft Sicherheit und erleichtert deren Nachnutzung. Daten und Ergebnisse müssen auch wissenschaftlichen Nutzern anderer Organisationen, der Öffentlichkeit und politischen Entscheidungsträgern zur Verfügung gestellt werden.

Um wissenschaftliche Ergebnisse vergleichen zu können, sind fachspezifische Standards und Konventionen einzuhalten. Es ist zu überprüfen, ob diese Konventionen vollständig, richtig und notwendig sind. Die Konsistenz von Modelldaten ist zu untersuchen, um zu vermeiden, dass Modelldifferenzen fälschlicherweise als geophysikalische Signale interpretiert werden.

## **Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten**

Ein Teil der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Forschung besteht aus der Entwicklung von Programmen und Programmsystemen. Für die jeweiligen Fragestellungen der diversen Forschungsbereiche sind zur Analyse von Beobachtungsdaten, der Sensorik oder zur Simulation von Prozessen entsprechende Programme zu realisieren. Um diese Programme oder auch Programmmodule über Jahre nutzen zu können, sind zur Entwicklung des Codes strenge Standards einzuhalten. Erst die Einhaltung von Standards erlaubt die Wiederverwendung und den Austausch der Module. Daher sind ein klarer und übersichtlicher Programmierstil des Codes und eine saubere Dokumentation dringend erforderlich. Am DGFI und an der FESG in Wettzell werden verschiedene Konzepte erarbeitet, um diese Standards und Richtlinien einzuhalten. Inhalt der Konzepte ist es, mit Hilfe von Programmen zur Versionsverwaltung von Software und Code (z.B. „Subversion“ SVN) und Dokumentationsassistenten wie Doxygen die Umsetzung von Standards zu unterstützen. Dazu wird für die Programmierung eine Sammlung von Leitfäden aufgestellt (sogenannte Design Rules), die die Standards für das Projektdesign, für die Erstellung des Quellcodes und der ausführbaren Programme, für Testprozeduren und für die Dokumentation sicherstellen. Solche Design Rules werden bereits heute durch die FESG am GO Wettzell umgesetzt (Dassing et al. 2008).

Arbeiten zur Umsetzung methodischer Grundlagen sind z.B. in der Entwicklung des Programmsystems DOGS (DGFI Orbit and Geodetic Parameter Estimation Software) erfolgt (Gerstl 1997, 1999). Das Programmsystem setzt Fortran-Standards streng um, bedient sich einer allgemeinen Formulierung und erlaubt somit die Lösung einer Vielzahl linearer Gleichungssysteme mit unterschiedlicher Parametrisierung nach möglichst strengen numerischen Verfahren. In ähnlicher Weise wird am IAPG eine Sammlung von MATLAB-Tools vorgehalten, die bei der sphärisch-harmonischen Synthese und Analyse, hauptsächlich bei Berechnungen zum Schwerefeld, eingesetzt wird.

Aufgaben zur Modellierung des Schwerefeldes, der Ionosphäre, des Magnetfeldes und anderer globaler Phänomene werden häufig mit Hilfe sphärisch-harmonischer Reihenentwicklungen beschrieben. Aufgrund der Abplattung der Erde ist bei der Verwendung von ellipsoidisch-harmonischen Reihenentwicklungen mit deutlichen Genauigkeitsgewinnen zu rechnen. Erste Ansätze zur Modellierung des Schwerefeldes wurden bereits am DGFI durchgeführt und evaluiert (Schmidt und Faber, 2008).

Simulatoren sind ein wesentliches Werkzeug für die Analyse von Sensorsystemen oder die Untersuchung von Prozessen. Im Vorfeld der Satellitenmissionen GRACE und GOCE wurde am IAPG ein Simulator entwickelt (Oberndorfer und Müller 2002, Wermuth et al. 2006, Pail et al. 2007), um die Sensitivität des Satellitensystems bezüglich bestimmter geophysikalischer Signale bestimmen zu können (siehe FB2). In ähnlicher Weise wurden am IAPG und an der KEG Simulationsrechnungen für das zur Erfassung des Magnetfeldes der Erde dienende Satellitensystem Swarm durchgeführt, um das zeitvariable Schwerefeld über die Bahnbestimmung der drei Swarm-Satelliten zu modellieren (Wang 2011).

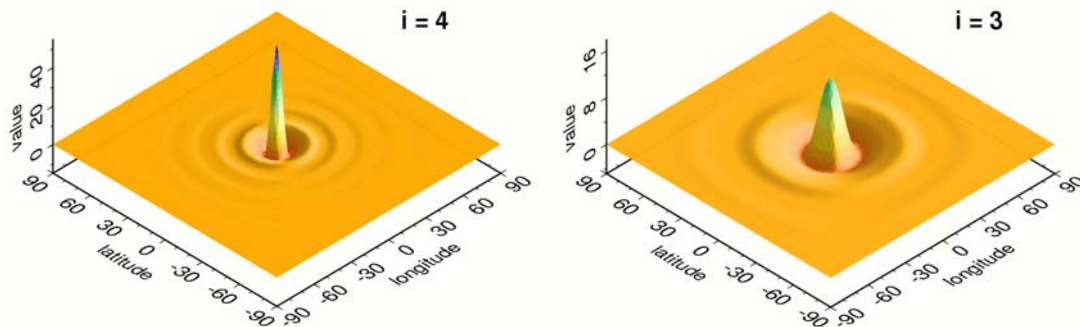
Gerade unter dem Aspekt der geodätischen Erdsystemforschung ist es essentiell, sowohl geometrische Signale als auch Schwerefeldsignale zu erfassen und zu kombinieren, um das gesamte System erklären zu können. Entsprechende Ansätze sind im Projekt „GGOS-D“ (Rothacher et al. 2011) verfolgt worden. Die Signale können durchaus fehlinterpretiert werden, wenn bei deren Analyse und Auswertung verschiedene Standards verwandt werden. Daher müssen in allen geodätischen und geophysikalischen Forschungsbereichen identische Standards eingehalten werden. Die IERS Conventions 2010 (Petit und Luzum 2010) sind ein solcher Standard, der für Untersuchungen zur Erdrotation und zu Referenzsystemen aufgestellt wurde. Derartige Standards sind ständig zu überprüfen und zu aktualisieren, um Vollständigkeit, Aktualität und Widerspruchsfreiheit sicherzustellen. Zur Überprüfung, Ergänzung und Einhaltung solcher Standards ist das GGOS-Büro für Standards und Konventionen unter Beteiligung von Mitarbeitern des DGFI und des IAPG/FESG eingerichtet worden.

## Programm und Themen

Die folgenden Forschungsthemen sollen innerhalb des FB4 zentral behandelt werden:

### **(1) Numerik, Algorithmenentwicklung und Parameterschätzung**

Aufgaben der Parameterschätzung in der Geodäsie führen häufig zu sehr großen Gleichungssystemen mit voll oder schwach besetzten Matrizen, Matrizen mit Bandstrukturen oder speziellen Blockdiagonalstrukturen. Für die Lösung, Inversion, Konditionierung, Datumsfestlegung und Stabilität solcher Gleichungssysteme sind geeignete Methoden zu entwickeln und bereitzustellen. Dabei sind direkte und iterative Lösungsstrategien zu berücksichtigen, z.B. Singulärwertzerlegung, QR-Orthogonalisierung, Konjugierte Gradienten oder der Lanczos-Algorithmus. Bei der Kombination von Normalgleichungen aus verschiedenen Beobachtungsverfahren soll die relative Gewichtung durch Varianzkomponentenschätzung objektiviert werden. Verfahren wie das Total Least Squares oder der Einsatz von Fuzzy Logik sind aufzubereiten. Für sehr rechenintensive Aufgaben wie z.B. die numerische Integration von Satellitenbahnen und die Bestimmung hoch aufgelöster Schwerefeldmodelle ist der Einsatz von Hochleistungsrechnern, der Einsatz von Grafikkarten, die Parallelisierung von Programmen, Multi-Prozessor- und Multi-Threading-Strategien sowie Konzepte zum Aufbau verteilter Rechnerressourcen, etwa durch „Grid computing“ zu untersuchen. Algorithmen für Analyse und Synthese hochgradiger sphärischer und ellipsoidisch-harmonischer Reihenentwicklungen sind weiterzuentwickeln. Transformationen zwischen sphärisch- und ellipsoidisch-harmonischen Reihenentwicklungen sind aufzubereiten, ebenso wie verschiedene Quadraturverfahren zur Umrechnung von Gitterwerten in sphärische Harmonische. Auch Funktionensysteme mit lokalem Träger, wie sphärische Splines oder Wavelets sind eingehender zu untersuchen, um regionale Multiresolutions-Analysen durchzuführen (Abbildung 11).



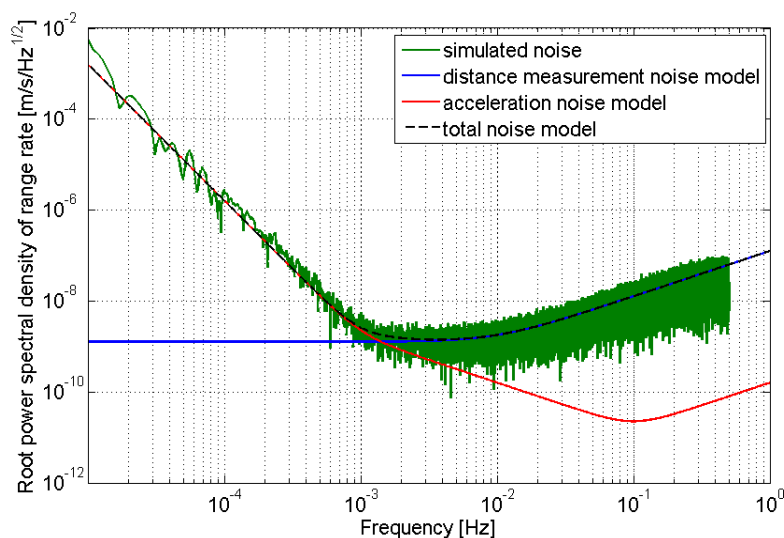
**Abbildung 11:** Darstellung sphärischer Skalierungsfunktionen (Blackman-Funktionen) als regionale Basisfunktionen.

## (2) Informatik

Die Qualitätssicherung von Software kann vor allem durch Entwicklung und Einhaltung von Software-Engineering-Standards mit verbindlichen Regeln zum Programmaufbau, zu Testverfahren und zur Versionierung und Dokumentation von Auswerteprogrammen sichergestellt werden. Speicherung, Beschreibung und Sicherung von Daten und Modellen nach einheitlichen Grundsätzen erleichtern Austausch und Nutzung. Dazu müssen Metadaten definiert und erfasst werden. Ergebnisse und Daten aus den jeweiligen Forschungsbereichen sollen für Dritte durch geeignete Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden. Internationale Standards (z.B. ISO19115) sind zu beachten. Aufbau und Pflege einer internen Wissensdatenbank vermeidet Doppelentwicklungen und beschleunigt die Programmentwicklung. Dazu sind als einer der ersten Schritte die bestehende Softwarekomponenten und Datenbestände in ihrer Gesamtheit zu erfassen und wenn nötig den geforderten Standards anzupassen.

## (3) Simulation neuer Sensorik

Analyseverfahren für neue oder bisher nicht genutzte Beobachtungstechniken sind zu entwickeln. Dazu gehören z.B. Sensitivitätsanalysen, die erkennen lassen, in welchem Umfang einzelne Beobachtungsverfahren zu welchen Zielparametern beitragen. Möglichkeiten zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses sind zu untersuchen. Es ist zu klären, wie sich die Abtastraten der Beobachtungstechniken auf die Schätzbarkeit von Zielparametern auswirken. Potenzial und Fehlerbudget neuer Sensorsysteme sollen durch Entwicklung und Nutzung von Simulatoren beurteilt und prädiert werden (Abbildung 12). Für die Planung von zukünftigen Satellitenmissionen für geodätische Fragestellungen sind daher möglichst realitätsnahe Simulatoren unerlässlich. Dazu gehören Closed-Loop-Missionssimulatoren und der Aufbau einer realistischen Simulationsumgebung (hinsichtlich Orbit und Schwerfeld; siehe FB 2) von SST-Missionen und Formationen. Beispiele für neue oder bisher wenig genutzte Messtechniken und -sensoren sind neue Altimetriesensoren mit erweitertem Auflösungs- und Abtastungsvermögen (CroySat-2, SWOT), bildgebendes SAR (z.B. TerraSAR-X) einschließlich interferometrischer Auswertung, GNSS-Reflektometrie, Radiometrie (SWOT) und Argo-Treibbojen.



**Abbildung 12:** Simulationsbeispiel für eine Satellitenmission nach dem Prinzip des low-low Satellite-to-Satellite-Tracking. Blau und rot: Fehlerspezifikation der Entfernungsmessung bzw. der akzelerometrischen Korrektur nichtgravitativer Beschleunigungen. Schwarz: Gesamtfehlerspezifikationen. Grün: Fehlerspektrum simulierter Beobachtungen der gravitativ verursachten Entfernungänderungen.

#### (4) Standards und Konventionen

Inkonsistenzen durch unterschiedlichen Gebrauch von Konstanten, durch verschiedene Zeitzensysteme und Reduktionsmodelle für atmosphärische, hydrologische und relativistische Effekte sind zu identifizieren und in ihren Auswirkungen abzuschätzen. Um zu vermeiden, dass solche Inkonsistenzen fälschlicherweise als geophysikalische Signale interpretiert werden, sollen Werte von Fundamentalkonstanten empfohlen und fachspezifische Regeln für die Anwendung von geophysikalischen Modellen aufgestellt werden. Existierende Standards und Konventionen sind zu bewerten, weiterzuentwickeln und in geodätische Regelwerke einzubringen.

#### (5) Kombination komplementärer Verfahren für das GGOS

Methodische Grundlagen zur Kombination geometrischer und gravimetrischer Beobachtungen sollen mit dem langfristigen Ziel entwickelt werden, einen umfassenden Satz von Parametern abzuleiten, mit dem Metrik und Gewicht des Systems Erde möglichst vollständig und genau beschrieben werden können. Zu den Parametern gehören z.B. Koordinaten, Geschwindigkeiten von Objekten, Erdorientierungsparameter, statische und zeitvariable Schwerefeldparameter, Quasar-Koordinaten. Die strenge Kombination aller verfügbaren Beobachtungsverfahren entspricht einer konsequenten Umsetzung des GGOS-Prinzips.

## Forschungsbereich 5: Neue Technologien

### Motivation und Zielsetzung

Neben der Laufendhaltung der Systeme der geodätischen Messverfahren zur Fortführung der mittlerweile langjährigen Zeitreihen ist im besonderen Maße die ingenieurmäßige Weiterentwicklung und technische Forschung im Hinblick auf den Einsatz für zukünftige Aufgaben und von neuen Technologien entscheidend. Dazu zählt die Verbesserung bestehender Messverfahren genauso, wie der Einsatz komplett neuer Techniken. In jüngerer Zeit wurden deshalb die klassischen geodätischen Raumverfahren (SLR, VLBI, GNSS) durch neue Entwicklungen zur Sagnac-Interferometrie auf der Basis quantenoptischer Systeme ergänzt. Der Einsatz von Atom-Interferometrie für die Schweremessungen, von optischen Frequenzkämmen und quantenoptischen Frequenznormalen verspricht eine weitere bedeutsame Steigerung des Auflösungsvermögens der geodätischen Messverfahren. Die unmittelbare Verknüpfung von Analyse und technischer Datengewinnung und die Einbeziehung anderer Disziplinen oder Dienste (z.B. Zeitdienste im Bereich der Zeit- und Frequenzinfrastruktur) sind dafür entscheidend und können im Rahmen des CGE geleistet werden. Wichtig sind auch Kontakte zu und Kooperationen mit Institutionen, welche mit der Entwicklung neuer Technologien beschäftigt sind, wie PTB, QUEST und DLR. Die neuen Technologien sind Wegbereitertechnologien für die zukünftigen Stationen des GGOS und können auf der Fundamentalstation Wettzell getestet werden.

### Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

Das Geodätische Observatorium (GO) Wettzell repräsentiert mit seinem einzigartigen Instrumentarium einen exzellent vermessenen Referenzpunkt und ist als Fundamentalstation in fast alle internationalen Dienste der Geodäsie eingebunden (Ausnahme: DORIS). Das GO Wettzell wird in Kooperation des BKG und der FESG im Rahmen der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) betrieben. Die FESG bringt sich hierbei besonders in der Weiterentwicklung der Messsysteme und in der Stellung von Personal zum Betrieb der Großgeräte ein. Zahlreiche weitere Kooperationen unterstützen neue Forschungsvorhaben (Hydrologie mit GFZ, VLBI2010 mit IGN Spanien usw.).

Das Radioteleskop Wettzell ist in das Beobachtungsprogramm des IVS eingebunden und hierin seit Jahren mit ca. 3500 Betriebsstunden jährlich das weltweit meist ausgelastete Teleskop für geodätische Messungen. Besonders im Rahmen der INTENSIVE-Beobachtungen zur Bestimmung von UT1-UTC ist es ein zentraler Ankerpunkt, wobei bereits zahlreiche Echtzeitverfahren (e-VLBI) genutzt werden, um die Produkte zeitnah anzubieten. Zudem dient das Teleskop häufig als Teststation für neue Techniken, wie zum Beispiel dem Digital Baseband Converter oder dem Spacecraft-Tracking am Beispiel von Mars und Venus Express.

Das GO Wettzell trägt im Rahmen des ILRS mit regelmäßigen Messungen zu allen unterstützten Satellitenmissionen bei. Es werden Laufzeiten von Laserpulsen, abgestrahlt von Bodenstationen zu künstlichen Erdsatelliten und zum Mond und zurück mit einer absoluten Genauigkeit von besser als 1cm gemessen. Neben rein geodätisch motivierten Satellitenmissionen wie LAGEOS, Stella und Etalon, welche unter anderem zur Bestimmung des ITRF und dessen Variation über lange Zeiträume hinweg herangezogen werden, erstreckt sich die heutige Beobachtungspalette zusätzlich über GNSS-, Altimetrie- und Erkundungssatelliten bis hin zu Zeitübertragungs- und

Transpondermissionen (T2L2 und Lunar Reconnaissance Orbiter LRO). Auch für die Bahnverbesserung des LRO wird das Wettzeller Teleskop eingesetzt. SLR liefert zudem den Maßstabsfaktor sowie den Bezug zum Ursprung für Kombinationslösungen und dient somit der Verbesserung der Bahnbestimmung.

Zudem wird von Wettzell aus ein GNSS-Netz betreut, das seine Daten in Echtzeit an die jeweiligen Dienste liefert (IGS sowie CONGO Realtime-Netz). Weitere Systeme dienen der Zeit- und Frequenzhaltung, Erdrotationsbestimmung mit Ringlasern, der Gravimetrie, Seismologie, Meteorologie und der lokalen Vermessung. Besonders die lokale Vermessung wird in Wettzell sorgfältig verfolgt. Neben diesen Standardaufgaben werden neue Techniken, wie die Rotationsseismologie, unterstützt.

Im Bereich der Fluggravimetrie steht im CGE ein kommerzielles Strapdown-Trägheitsplattform-System (SINS) zur Verfügung, auf dessen Basis erste Versuche unternommen wurden (Gerlach et al. 2010). Daneben wird seit vielen Jahren an der BADW an der Entwicklung eines eigenen Systems gearbeitet. Hier werden tiefergehende Arbeiten im Bereich der Optimierung der Komponenten des Gesamtsystems geleistet, die als Basis für weitere Versuchskampagnen dienen.

Die Arbeiten des FB5 sind eingebunden in nationale und internationale Kooperationen und Dienste. Neben den auf S. 7f genannten Kooperationen und Diensten sind zu nennen:

- NEXPREs (Novel EXplorations Pushing Robust e-VLBI Services)
- Monitoring and Control Interface (MCI) Collaboration Group
- GGOS Working Group for Communication and Automation (in der Planung).

Wichtige Kooperationspartner neben den FGS-Partnern sind

- Max-Planck-Institut für Radioastronomie Bonn
- Joint Institute for VLBI in Europe (Jive), Niederlande
- University of Canterbury (UoC), Christchurch, Neuseeland
- MIT Haystack Observatory, USA
- Geophysikalisches Observatorium der LMU, Fürstfeldbruck
- Scripps Institution of Oceanography, USA

## Programm und Themen

Die Arbeiten am GO Wettzell sind eingebunden in die internationalen Dienste und werden im Rahmen der Vereinbarung der FGS durchgeführt. Die enge Kooperation der beteiligten Institute und Einrichtungen ermöglicht die Erfüllung von Aufgaben in einem breiten Forschungs- und Aufgabenfeld, so dass sich in den nachfolgenden Zielsetzungen Überschneidungen zum Forschungsprogramm der FGS 2011-2015 ergeben. Hierbei ist speziell auch die Kooperation von BKG und CGE am Standort Wettzell von entscheidendem Vorteil. Die Arbeiten im FB5 des CGE sind mit den Zielen des FGS Forschungsprogramms abgestimmt und sollen diese wesentlich unterstützen.

### (1) Zeit und Frequenz

Zeit und Frequenz spielen in den heutigen (geometrischen) Messverfahren eine fundamentale Rolle, die mit dem Aufkommen ultrastabiler Uhren in Zukunft noch weiter verstärkt werden wird. Langfristig wird die punktweise Potenzialmessung mit ultrastabilen Oszillatoren die Schweremessung revolutionieren. Es ist daher unerlässlich, die gegenwärtigen Entwicklungen hochstabiler Oszillatoren und Zeit-/Frequenzvergleichstechniken genau zu verfolgen. Die Analyse der Nutzungsmöglichkeiten in der Geodäsie und die Untersuchung mittels geeigneter Tests am GO Wettzell sind deshalb wesentliche Vorhaben in den kommenden Jahren.



### a) Zeitsynchronisation durch Fasertechnik

Die konsistente Anbindung aller Messgeräte des Observatoriums an ein stabiles Zeitsystem ist Voraussetzung für die konsistente Kombination der Messungen auf Beobachtungsstufe, d.h. unter Ausnutzung gleicher Uhrenparameter für die verschiedenen Systeme, z.B. VLBI und GNSS. Neue glasfaserbasierte und phasenstabilisierte Übertragungstechniken erlauben es heute schon, Epochen mit einer Genauigkeit von wenigen Pikosekunden über mehrere hundert Kilometer hinweg zu übertragen. Im Hinblick auf zukünftige Anforderungen zur Zeitübertragung und damit zur Anbindung von Messsystemen, wie zum Beispiel die Anbindung des Lasers an das Zeitsystem, spielen diese neuen Techniken unter Einführung der Frequenzkammtechnologie im Bereich der geodätischen Raumverfahren eine wesentliche Rolle. Deshalb soll die Anbindung der Beobachtungssysteme auf dem Observatorium sowie die Vernetzung von Zeitlaboren untersucht werden. Ziel ist die geodätische Nutzung eines vorzüglich vermessenen Punktes in der Raum-Zeit.

### b) Verbesserung der Kurzzeitstabilität des Zeitsystems

Insbesondere VLBI erfordert als Einwegmessverfahren eine Zeitbasis mit hoher Kurzzeitstabilität. Heute werden hierzu Wasserstoffmaser verwendet. Der Großringlaser "G" ist als Resonator mit einem Q-Faktor  $< 10^{12}$  geeignet, die Kurzzeitstabilität um 1–2 Größenordnungen im Integrationsbereich 1–1000 Sekunden weiter zu steigern. Ein Gewinn kann für VLBI durch eine dadurch mögliche Verlängerung der Kohärenzzeit in der Korrelation der Rohmessungen erwartet werden und ist daher als mittelfristige Fortentwicklung des GO Wettzell zu untersuchen.

Zusätzlich wird erwartet, dass der optische Resonator des G-Ringlasers auf dem GO Wettzell durch seine hohe Resonatorgüte die erforderlichen Voraussetzungen zur Verbesserung der Kurzzeitstabilität von Cäsium-Standards erfüllt. Beispielsweise konnte die Anbindung eines optischen Resonators mit einer deutlich geringeren Resonatorgüte ( $Q \sim 50'000$ ) an den Cäsium-Primärstandard CSF1 über einen optischen Frequenzkamm durch die PTB erfolgreich vorgenommen werden. Mit Hilfe des „G“ sollen deshalb die bisherigen Ergebnisse der PTB noch einmal deutlich verbessert werden, ohne dass die Ringlaserfunktionen (Rotationsmessungen) eingeschränkt werden.



**Abbildung 13:** Die heutige Zeit- und Frequenzverteilung in Wettzell basiert auf mehreren H-Masern und Cs-Frequenznormalen, die mit einer Masterclock verglichen werden.



## (2) VLBI

### a) Unterstützung für neue VLBI2010 Techniken (TWIN Radioteleskop Wettzell)

Gegenwärtig werden für das GO Wettzell zwei baugleiche neue Radioteleskope aufgebaut (TWIN-Konzept, Neidhardt et al. 2010b), welche vom BKG projiziert sind und die Entwicklungsziele der VLBI2010-Projektgruppe umsetzen sollen (Niell et al. 2004). Im Rahmen der Realisierung dieses Projekts sind neben apparativen Entwicklungen auch Untersuchungen zu neuen Beobachtungsstrategien durchzuführen, die die interne Systemstabilität verbessern (neue Pointing- und Leistungstests durch holographische Nutzung der Teleskope und Null-Basislinien-Messungen; oder auch Ideen nach Lösler et al. 2010) sowie die geodätischen Messungen dichter an die GGOS-Ziele heranführen. Bereits laufende Untersuchungen an der Universität Bonn sollen hierbei mit geeigneten Tests an den Systemen begleitet werden.

Grundsätzlich können die Teleskope TWIN und RTW elektronisch zu einer großen Gesamtapertur zusammengeschaltet werden. In Kombination mit der Nutzung der gleichen Bezugsfrequenz (Common Clock) und der Integration eines programmierbaren Phasenschiebers bzw. einer Verzögerungsleitung zum Ausgleich der Laufzeitdifferenzen zwischen den 3 Teleskopen, ergeben sich neue Beobachtungsmöglichkeiten. Dazu sind auch neue Beobachtungsabläufe zu entwickeln und zu untersuchen. Möglichkeiten bieten hier auch die Fernsteuertechniken, die aktuell am Observatorium entwickelt werden und zur Steuerung der Radioteleskope des Observatoriums von einem Ort aus dienen. Die Entwicklungskooperationen wie zum Beispiel unter NEXPreS (Novel EXplorations Pushing Robust e-VLBI Services) werden weiter fortgeführt.

### b) Neukonzipierung der Kalibrierung der Systemtransferzeiten

Im Rahmen der Verbesserung des Zeitsystems des GO Wettzell kann auch eine Neugestaltung der Kalibriereinrichtungen der Radioteleskope realisiert werden. Speziell die Phasenkalibrierung (Phascal) und die Kabellängenbestimmung sollen durch die neuen Möglich-



**Abbildung 14:** Das TWIN Radioteleskop Wettzell (TTW).

keiten der optischen Übertragung von Frequenzen (Transferoszillator) und ultrakurzer Pulse (Frequenzkamm) für neue Konzepte im Hinblick auf eine Verbesserung der Stabilität der Referenz der Radioteleskope untersucht werden.

#### **c) Nutzung des bestehenden Teleskops (RTW)**

Mit der vollen Inbetriebnahme des TWIN wird die Hauptbeobachtungslast vom bestehenden Teleskop auf das neue System übertragen. Über eine längere Zeit hinweg ist dabei noch die Fortführung der Zeitreihen zu gewährleisten. Anschließend wird das 20m-Teleskop mit der wesentlich größeren Apertur und damit der größeren Systemempfindlichkeit für zukünftige Aufgaben frei. Diese Eigenschaften eines solchen Teleskops sind besonders für astronomische und astrometrische Messungen wichtig, wie zur Untersuchung von Quellenstrukturen. Die Erhaltung der Funktionsfähigkeit bzw. ein Umbau auf neue Frequenzen soll dazu untersucht und gegebenenfalls durchgeführt werden, was auch für die Beobachtung von Raumsonden und die weiteren Fortentwicklungen der VLBI-Technik wichtig ist.

### **(3) SLR/LLR**

#### **a) Transponderanwendungen**

Einweg-Streckenmessungen per Laser und optische Transponderanwendungen haben sich in den letzten Jahren als neue Techniken in der Satellitenentfernungsmessung herausgebildet. Neben einigen vorbereitenden Simulationsexperimenten, die im Rahmen des Forschungsprogramms der FGS in den Jahren 2005 bis 2010 in Form von Pilotprojekten realisiert wurden, hat das GO Wettzell diese Verfahren bei der Unterstützung des LRO aktiv eingesetzt.

#### **b) Zeitübertragung (ACES)**

Eine weitere Anwendung dieser Technologien ist für die Mission Atomic Clock Experiment in Space (ACES) im Rahmen des European Laser Time Transfer Projekts (ELT, 2013–2015) in Vorbereitung. Während der Schwerpunkt der Beobachtungen im Rahmen der LRO-Mission bei der Bahnbestimmung (Gravitationsfeld) im Mondorbit liegt, kommt es bei dem ACES-Projekt auf eine exakte Zeitübertragung mit einer Genauigkeit von besser als 50 ps zwischen der Master-Clock des GO Wettzell und der PHARAO-Uhr im erdnahen Orbit an. Wettzell kommt aufgrund seines für geodätische Beobachtungen optimierten Zeitsystems im Rahmen des ILRS eine besondere Bedeutung zu. Dies konnte beispielsweise im Rahmen des Projekts T2L2 gezeigt werden. Das Konzept der Zeitübertragung zu ACES wurde in Wettzell, München und Prag in den Jahren 2008/2009 in einer Zusammenarbeit zwischen EADS, TUM und CTU durch die ESA gefördert und ist im Rahmen der Mission mittlerweile definiert. Die erforderlichen Beobachtungen werden aufgrund der Wellenlängenspezifikation (532 nm) mit dem WLRS zu beobachten sein. Die FESG wird das ELT-Datenzentrum aufbauen und zusammen mit dem DGFI betreiben.

#### **c) Zweifarbenlaser**

In Wettzell und Concepcion (Chile) werden die gegenwärtig einzigen Zweifarben-Lasersysteme betrieben. Der Nutzen der in den Messungen enthaltenen Zusatzinformation zur Modellierung troposphärischer Effekte soll analysiert werden. Gemeinsam mit Informationen über die Atmosphäre, welche durch andere Raumverfahren (VLBI, GNSS) und weitere Sensoren (Wasserdampfadiometer) gewonnen werden, soll das Potenzial zur Verbesserung troposphärischer Einflüsse auf die geodätischen Messungen ausgeschöpft werden. In Wettzell sollen Möglichkeiten einer Vierfarben-Messung (simultane Messung beider SLR-Systeme) mit zusätzlicher Kombination von zwei Mikrowellen-Frequenzen (ACES Terminal) ausgelotet werden.



**Abbildung 15:** Tracking-Stationen des CONGO-Netzwerks. QZSS-fähige Stationen sind in rot dargestellt (Stand November 2011).

#### (4) GNSS

##### a) Neue Satellitensysteme und Signale

Der Aufbau des COoperative Network for GIOVE Observation (CONGO) wurde im Jahr 2009 von der DLR und dem BKG initiiert, um global die Signale der beiden Galileo In Orbit Validation Element (GIOVE) Satelliten erfassen zu können. Inzwischen tragen auch andere Institutionen, z.B. das GFZ, mit GNSS-Stationen zum CONGO-Netz bei. Die CONGO-Station in Wettzell nimmt dabei eine besondere Stellung ein, da dort drei verschiedene GIOVE-fähige Empfänger an einer Antenne betrieben werden und somit detaillierte Untersuchungen der unterschiedlichen Signale ermöglichen. Basierend auf den Beobachtungsdaten des globalen CONGO-Netztes werden am IAPG Bahn- und Uhrenparameter der beiden GIOVE-Satelliten sowie des ersten Satelliten des japanischen Quasi Zenith Satellite System (QZSS) bestimmt und analysiert. Diese Analysen sollen auf die Galileo In Orbit Validation (IOV) Satelliten und auf die operationellen Galileo-Satelliten ausgedehnt werden und die neuen Möglichkeiten dieses GNSS (z.B. drei Frequenzen, hochgenaue Wasserstoffmaser) untersucht werden.

##### b) Untersuchung der technischen Einflüsse auf die Beobachtung

Aufgrund der auf einem Geodätischen Observatorium in idealer Weise vorhandenen Infrastruktur lassen sich auch die technischen Einflüsse bei den GNSS-Aufzeichnungen untersuchen. Besonders Effekte wie Mehrwegeausbreitung der Signale (Multipath), Antennen- und Empfängereigenschaften in einem realen Aufbau oder Probleme beim Anschluss an die lokale Zeit- und Frequenzinfrastruktur sollen so mit geeigneten Testszenarien technisch vor Ort erprobt werden. Eine enge Einbindung der Analysen ist hierbei von entscheidender Bedeutung, was besonders im Rahmen des CGE geleistet werden kann.

#### (5) Ringlaser

##### a) Ringlaserintegration in VLBI-Analyse

Die stetig in der Genauigkeit zunehmenden Beobachtungsdaten aus den Ringlasern können in zukünftige geodätische Messprogramme ebenso einfließen, wie sie neue Forschungsdiszip-

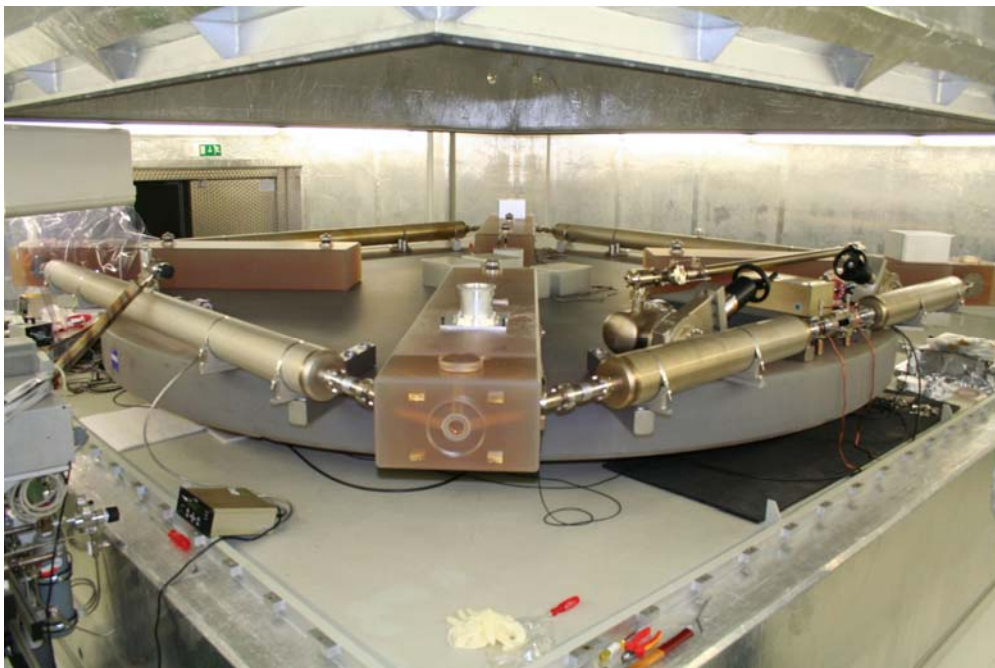
linien eröffnen (z.B. die Rotationsseismik). Ein erster Schritt hierbei ist die Integration der Daten in die VLBI-Analyse. Im Rahmen der Forschergruppe „Erdrotation“ wurden in der ersten Förderungsphase 2005–2008 Ringlasermessungen in die VLBI-Auswertungen integriert (Mendes Cerveira et al. 2009). Die Integration der Ringlasermessungen zeigt insbesondere im Kurzzeitbereich Verbesserungen der Erdrotationsserien (Nilsson et al. 2011) und soll im Rahmen des CGE in Richtung eines neuen operationellen Produktes weiter ausgebaut werden.

#### **b) Ausbau der Leistungsfähigkeit von Ringlasern**

Große Ringlaser mit einer Empfindlichkeit von  $9 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$  lösen externe Drehraten von  $\approx 10^{-7} \text{ rad s}^{-1}$  auf. Dies entspricht bei Integrationszeiten von 1800 s (0,5 Stunden) einem relativen Auflösungsvermögen  $\Delta\Omega/\Omega$  von etwa  $10^{-9}$ . Da sich nicht nur Variationen der globalen Erddrehrate in den Zeitreihen der Sagnac-Frequenz widerspiegeln, sondern auch lokale Rotationsanteile, mikroseismische Erschütterungen (mit Rotationsanteil) und apparative Artefakte, besteht grundsätzlich das Problem, die einzelnen Ursachen von Störsignalen von den Beiträgen der Erddrehrate zu separieren. Die Kopplung der beiden Umlaufsinne im Ringlaser durch Rückstreuung stellt zurzeit den größten systematischen Restfehler im G-Ringlaser dar. Die Entwicklung eines effektiven Offline-Verfahrens zur Korrektur dieses Fehlers hat in den kommenden Jahren hohe Priorität. Zudem sollen Umwelteinflüsse auf den Ringlaser weiter untersucht werden.

#### **c) Entwicklung eines weiteren großen Ringlasers mit mehreren Komponenten**

In den vergangenen 2 Jahren hat die Ringlasergruppe durch eine Kooperation mit der Universität Pisa und dem INFN den Aufbau eines Ringlasers (GEOsensor Design) für den Einsatz bei dem Gravitationswellenexperiment Virgo ermöglicht (Lantz et al. 2009). Die Vorarbeiten zur Entwicklung eines großen Ringlasersystems im Gran Sasso Massiv befinden sich im Rahmen der Kooperation von INFN (Pisa), BKG, TUM (Wettzell) und UoC (Christchurch) im fortgeschrittenen Stadium. Der Ausbau dieser Vorhaben soll deshalb weiter vorangetrieben werden.



**Abbildung 16:** Der Großringlaser G am GO Wettzell.



## **(6) Automatisierung und Fernsteuerung**

### **a) Kontrollsystem zum weitgehenden automatischen Betrieb**

Im Rahmen der Software-Entwicklungen für die neuen Messsysteme in Wettzell entstand unter anderem ein Kontrollsystem für die Laserentfernungsmessung (SLR2.0), welches auch die automatische Abwicklung von SLR-Beobachtungen zulässt (Neidhardt et al. 2009). Es ist auf Modularität ausgelegt, folgt den allgemeinen Entwicklungs- und Designregeln des Observatoriums und soll alle wesentlichen Beobachtungsabläufe autonom abwickeln. Zudem werden wegen des anstehenden Betriebs zweier SLR-Systeme auch die LLR-Beobachtungen wieder in das Kontrollsystem eingefügt. Ähnliche Softwareentwicklungen laufen aktuell auch für die VLBI Systeme (e-RemoteControl). In den kommenden Jahren sollen diese Systeme zur verteilten Kontrolle von mehreren, fernsteuerbaren Radioteleskopen anhand einer Softwarebasis ausgebaut und eingesetzt werden (siehe VLBI2010-Techniken). Ziel ist der Aufbau eines einheitlichen Softwaresystems zur automatischen und abgesicherten (Fern-)Steuerung aller Großgeräte auf der Station.

### **b) In-Sky-Laser-Safety**

Im Zentrum der Automatisierung im Bereich der Laserentfernungsmessung steht die Gewährleistung der Sicherheit. Hierzu zählen der Schutz von Mensch und System auf dem Observatorium sowie die Augensicherheit für Teilnehmer am Flugverkehr. Gegenwärtig werden die Laserbeobachtungen mit einem Radarsystem abgesichert, jedoch steht das gepulste System in Wettzell nicht mit den Frequenzbereichen des VLBI2010-Konzepts (siehe TWIN-Radioteleskop) im Einklang. Des Weiteren ist eine optimierte Rückregelung der Leistung des Lasers erforderlich. So sollen Möglichkeiten analysiert und getestet werden, die eine hinreichende In-Sky-Laser-Safety gewährleisten. Die hierbei mögliche Nutzung von Radiotranspondersystemen steht in Wettzell am Anfang und soll weiter ausgebaut werden. Auch alternative optische Methoden werden weiter verfolgt. Zusätzliche Anforderungen ergeben sich durch das ELT-Projekt, da ACES auf der ISS mitfliegt. Die Absicherung des Luftraums wird ergänzt durch ein lokales Monitoring System auf dem Observatorium, welches die Funktions- und Betriebssicherheit der Anlagen gewährleistet. Dieses ist entsprechend auszubauen und anzupassen.

## **(7) Allgemeine Infrastruktur und weitere Technologien**

### **a) Netzwerktechnik und Informationstechnik**

In Zeiten steigenden Netzwerkverkehrs wird es auch für ein Observatorium immer wichtiger, geeignete Strukturen zur Optimierung der Kommunikation und zur Gewährleistung einer sicheren Kommunikation umzusetzen. In Wettzell sollen deshalb die einzelnen Messsysteme in Kooperation mit den betreibenden Einrichtungen in geeignete Netzwerknklaven aufgeteilt werden. Diese bilden unabhängige Einheiten und sind nur mittels sicherer Schlüssel von außen zugänglich. Dadurch wird der Einfluss der Rechneinheiten untereinander auf zeitkritische Messaufgaben besser kontrollierbar. Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Schaffung der Voraussetzung für Echtzeit-Dienstleistungen, wie zum Beispiel e-VLBI oder die Zeitanbindung an externe Zeitdienste über Glasfaser. Geeignete Protokolle, Formate, Speichertechniken und Abläufe sind zu planen und könnten teilweise aus Untersuchungen zu astronomischen Datenübertragungen, wie zum Beispiel beim Square Kilometer Array, entnommen werden.

### **b) Meteorologie und Hydrologie**

Im Rahmen mehrerer gemeinsamer Projekte des GO Wettzell mit dem GFZ wurden zahlreiche hydrologische Studien durchgeführt. Die besonders für die Schweremessung interessanten Analysen aus den Datenreihen der hydrologischen und meteorologischen Sensoren können zur Verbesserung der Messergebnisse dienen. Das Potenzial dieser Messungen soll in

den kommenden Jahren weiter untersucht werden. Auch der Aufbau und die Verteilung der meteorologischen Sensoren sowie die Einbindung anderer Messverfahren für den Wasserdampfgehalt der Luft können zusätzliche Parameter für die Analyse bereithalten.

#### **c) Integration von DORIS**

Zur Vervollständigung der heutigen geodätischen Raumverfahren kolokiert auf einem Observatorium wie dem in Wettzell ist auch die Installation des französischen DORIS-Systems wieder in Betracht zu ziehen. Hierbei ist besonders die Untersuchung der gegenseitigen Interferenzen für VLBI2010 zu beachten. Die Integration von DORIS in einem observatoriumsnahen Bereich wäre besonders im Hinblick auf die Überführung in eine GGOS-Station geodätisch interessant, auch wenn sie wegen der aktuell idealen Abdeckung der Messstationen in Europa durch bereits existierende Stationen für DORIS selbst nur untergeordnete Priorität hat. Entsprechende Vorhaben sind zu planen und anzustoßen.

#### **d) Gravimetrie**

Techniken zur Gewinnung von Schwerefeldinformationen mit flugzeuggestützten Verfahren (Fluggravimetrie, inertielle Messplattform) sollen weiterentwickelt und weiter erprobt werden (siehe FB2). Innerhalb des CGE wurden Versuche mit einem kommerziellen SINS durchgeführt, die zeigen, dass Verfahren und Instrumentierung prinzipiell zur Fluggravimetrie geeignet sind. Weitaus tiefergehende Untersuchungen wurden seit vielen Jahren an der BADW durchgeführt (Boedecker und Stürze 2006), wo basierend auf inertialen Sensoren eine speziell für die Fluggravimetrie geeignete Plattform entwickelt wird, das Strapdown Airborne Gravimetry System (SAGS). Die Entwicklungsarbeiten sollen in den nächsten zwei Jahren abgeschlossen werden, so dass die Plattform für Messkampagnen einsetzbar ist. Der Vorteil des SAGS gegenüber herkömmlichen plattformstabilisierten Systemen ist, dass nicht nur die Schwere als Betrag, sondern der gesamte Schwerevektor abgeleitet werden kann. Ziel der SAGS-Entwicklung ist außerdem eine Erhöhung der räumliche Auflösung. Neben der Fluggravimetrie soll auch die Entwicklung neuartiger, festinstallierter Sensoren für die Schweremessung (z.B. Schwerebestimmung mittels gravitativer Einflüsse auf optische Uhren oder Quantensensoren) genau verfolgt werden. Nötige Kontakte und Kooperationen zu Forschungsgruppen sollen entstehen, um dieses Feld weiter auszubauen.

#### **e) SAR-Techniken**

Ein weiteres Aufgabengebiet wird auch im Bereich der Radarfernerkundung durch SAR möglich. Neuen Missionen wie TerraSAR-X und TanDEM-X ermöglichen die Beobachtung der Erde bei Tag und Nacht unabhängig von den meteorologischen Verhältnissen in bislang ungekannter Qualität. Das Observatorium in Wettzell unterstützt die Arbeiten, indem zur Kalibration von TerraSAR-X/TanDEM-X ein Referenzreflektor auf dem Hügel des Ringlasers installiert wurde. Im Rahmen des CGE sollen die konsistente Kombination von flächenhafter geometrischer Information aus SAR und SAR-Interferometrie mit punktwisen GNSS-Messungen sowie gemeinsame Störeinflüsse wie troposphärische Verzögerungen untersucht werden.

#### **f) Verknüpfung der Messverfahren über Troposphäreneinflüsse**

Neben der Nutzung eines gemeinsamen Zeitsystems und der hochgenauen örtlichen Vermessung stellt die Tatsache, dass alle Raumverfahren an einem Standort den gleichen atmosphärischen Bedingungen unterliegen, eine weitere Möglichkeit dar, die Verknüpfung der Raumverfahren zu realisieren. Aus diesem Grund sollen Überlegungen zum Messablauf und Messverfahren angestellt werden, wie die atmosphärischen Gegebenheiten für diese Station dargestellt und bestimmt werden sollen.

## Literaturverzeichnis

- Albertella A, Rummel R: On the spectral consistency of the altimetric ocean and geoid surface: a one-dimensional example. *Journal of Geodesy* 83(9), 805-815, doi: 10.1007/s00190-008-0299-5, 2009
- Allianz der Deutschen Wissenschaftsorganisationen: Grundsätze zum Umgang mit Forschungsdaten, <http://www.allianzinitiative.de/de/handlungsfelder/forschungsdaten/grundsätze/>, 2010
- Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L: ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy* 85(8), 457-473, doi: 10.1007/s00190-011-0444-4, 2011
- Angermann D, Drewes H, Gerstl M, Krügel M, Meisel B: DGFI combination methodology for ITRF2005 computation. In: Drewes, H. (Hrsg.): *Geodetic Reference Frames, IAG Symposia*, Band. 134, 11-16, doi: 10.1007/978-3-642-00860-3, 2009
- Angermann D, Seitz M, Drewes H: Analysis of the DORIS Contributions to ITRF2008. *Advances in Space Research* 46(12), 1633-1647, doi:10.1016/j.asr.2010.07.018, 2010
- Bingham RJ, Knudsen P, Andersen O, Pail R: An initial estimate of the North Atlantic steady-state geostrophic circulation from GOCE. *Geophysical Research Letters* 38, L01606, doi: 10.1029/2010GL045633, 2011
- Boedecker G, Stürze A: SAGS4 - StrapDown Airborne Gravimetry System Analysis. In: Flury J, Rummel R, Reigber C, Rothacher M, Boedecker G, Schreiber U (Hrsg.): *Observation of the Earth System from Space*, Springer, Berlin, S.463-478, 2006
- Bouman J, Bosch W, Sebera J: Assessment of systematic errors in the computation of gravity gradients from satellite altimeter data. *Marine Geodesy* 34(2), 85-107, doi: 10.1080/01490419.2010.518498, 2011
- Bouman J, Fiorot S, Fuchs M, Gruber T, Schrama E, Tscherning CC, Veicherts M, Visser P: GOCE gravitational gradients along the orbit. *Journal of Geodesy*, 85(11), 791-805, doi: 10.1007/s00190-011-0464-0, 2011
- Dassing R, Lauber P., Neidhardt A.: Design Rules für die strukturierte Programmierung unter C und die objektorientierte Programmierung unter C++. *Fundamentalstation Wetzell, Dokument 20040107DesignRulesCundCPP*, 2008
- Dettmering D, Bosch W: Global Calibration of Jason-2 by Multi-Mission Crossover Analysis. *Marine Geodesy*, 33(S1), 150-161, doi: 10.1080/01490419.2010.487779, 2010
- Drewes H: Update of the velocity field model for South America. *SIRGAS Boletín Informativo*, No. 13, 2008
- Ettl M, Neidhardt A, Mühlbauer M, Plötz C, Beaudoin C: The Wetzell system monitoring concept and first realizations. In: Behrend D, Baver KD (Hrsg.) *VLBI2010: From Vision to Reality, IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864*, pp 444-448, NASA, Goddard Space Flight Center, 2010
- Fecher T: *Methodische Grundlagen von kombinierten Schwerefeldmodellen. IAPG/FESG-Schriftenreihe 26*, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, ISBN (Print) 978-3-934205-25-3, ISSN 1437-8280, 2008
- Forschungsgruppe Satellitengeodäsie: *Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2011-2015*. München, Frankfurt, Bonn, 2010
- Frommknecht B: *Integrated sensor analysis of the GRACE mission. DGK, Reihe C, Heft 617*, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, ISBN (Print) 3-7696-5056-5, ISSN 0065-5325, 2008
- Gerlach C, Dorobantu R, Ackermann C, Kjörsvik N, Boedecker G: Preliminary Results from an INS/GPS airborne gravimetry experiment over the German Alps. In: Mertikas SP (Hrsg.) *Gravity, Geoid and Earth Observation, IAG Symposia*, Band 135, S. 3-10, Springer, doi: 10.1007/978-3-642-10634-7\_32, 2010
- Gerstl M: *Parameterschätzung in DOGS-OC*. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, DGFI interner Bericht Nr. MG/01/1996/DGFI, München, 1997
- Gerstl M: *Mathematische Grundlagen für die Satellitenbahnbestimmung*. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München, 1999
- Gross RS, Fukumori I, Menemenlis D: Atmospheric and oceanic excitation of the Earth's wobbles during 1980-2000. *Journal of Geophysical Research* 108(B8), 2370, doi:10.1029/2002JB002143, 2003
- Gruber T, Bamber JL, Bierkens MFP, Dobslaw H, Murböck M, Thomas M, van Beek LPH, van Dam T, Vermeersen LLA, Visser P: Simulation of the time-variable gravity field by means of coupled geophysical models. *Earth System Science Data* 3(1), 19-35, Copernicus Publications, ISSN 1866-3591, doi: 10.5194/essd-3-19-2011, 2011a



- Gruber T, Visser PNAM, Ackermann C, Hosse M: Validation of GOCE gravity field models by means of orbit residuals and geoid comparisons. *Journal of Geodesy*, 85(11), 845-860, doi: 10.1007/s00190-011-0486-7, 2011b
- Horwath M, Dietrich R: Signal and error in mass change inferences from GRACE: the case of Antarctica. *Geophysical Journal International* 177(3), 849-864, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04139.x, 2009
- Klügel T, Schreiber U, Schlüter W, Velikoseltsev A: Advances in inertial Earth rotation measurements – new data from the Wettzell G ring laser. *Proceedings Journées 2007*, 17-19 September, Paris, 173-176, 2008
- Krügel M, Thaller D, Tesmer V, Rothacher M, Angermann D, Schmid R: Tropospheric parameters: combination studies based on homogeneous VLBI and GPS data. *Journal of Geodesy* 81(6-8), 515-527, doi: 10.1007/s00190-006-0127-8, 2007
- Kusche J, Schrama E: Surface mass redistribution inversion from global GPS deformation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) gravity data, *Journal of Geophysical Research* 110, B09409, doi:10.1029/2004JB003556, 2005
- Lantz B, Schofield R, O'Reilly B, Clark D E, and DeBra D: Requirements for a Ground Rotation Sensor to Improve Advanced LIGO. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B), 980-989, doi: 10.1785/0120080199, 2009
- Lösler M, Eschelbach C, Schenk A, Neidhardt A: Permanentüberwachung des 20 m VLBI-Radioteleskops an der Fundamentalstation in Wettzell. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 135(1), 40-48, 2010
- Marcos M, Wöppelmann G, Bosch W, Savcenko R: Decadal sea level trends in the Bay of Biscay from tide gauges, GPS and TOPEX. *Journal of Marine Systems* 68(3-4), 529-536, doi: 10.1016/j.jmarsys.2007.02.006, 2007
- Mendes Cerveira PJ, Boehm J, Schuh H, Klügel T, Velikoseltsev A, Schreiber KU, Brzezinski A: Earth rotation observed by very long baseline interferometry and ring laser. *Pure and Applied Geophysics* 166(8-9), 1499-1517, doi: 10.1007/s00024-004-0487-z, 2009
- Molera Calvés G, Wagner J, Neidhardt A, Kronschnabl G, Peréz Ayúcar M, Cimó G, Pogrebenko S: First results of Venus Express spacecraft observations with Wettzell; in: Behrend D, Baver KD (Hrsg.) VLBI2010: From Vision to Reality, IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864, pp 171-175, NASA, Goddard Space Flight Center, 2010
- Murböck M: Genauigkeitssimulation von Schwerefeld-Satellitenmissionen; IAPG/FESG-Schriftenreihe, Nr. 30, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, ISBN (Print) 978-3-934205-29-1, ISSN 1437-8280, 2011
- Neidhardt A, Ettl M, Lauber P, Leidig A, Dassing R, Mühlbauer M, Plötz C: New concepts in control systems for SLR with remotely accessible, autonomous process cells. In: Schillak S (Hrsg.): *Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging, SLR – the Next Generation*, Vol. 2, pp 456-461, Space Research Centre, Polish Academy of Sciences, 2009
- Neidhardt A, Ettl M, Plötz C, Mühlbauer M, Hase H, Sobarzo Guzmán S, Herrera Ruztort C, Alef W, Rottmann H, Himwich E: Interacting with radio telescopes in real-time during VLBI sessions using e-control; *Proceedings of Science (PoS) – 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting: VLBI and the new generation of radio arrays*, Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA), 2010a
- Neidhardt A, Kronschnabl G, Klügel T, Hase H, Pausch K, Göldi W: The TWIN radio telescope project at Wettzell, Germany. *Proceedings of Science (PoS) – 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting: VLBI and the new generation of radio arrays*, Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA), 2010b
- Niell A, Whitney A, Petrachenko B, Schlüter W, Vandenberg N, Hase H, Koyama Y, Ma Ch, Schuh H, Tuccari G: VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. *IVS Memorandum* 2006-008v01, 2004
- Nilsson T, Böhm J, Schuh H, Schreiber KU, Gebauer A, Klügel T: Combining VLBI and ringlaser observations for determination of high frequency Earth rotation variation. *Journal of Geodynamics*, eingereicht, 2011
- Nothnagel A, Angermann D, Börger K, Dietrich R, Drewes H, Görres B, Hugentobler U, Ihde J, Müller J, Oberst J, Pätzold M, Richter B, Rothacher M, Schreiber U, Schuh H, Soffel M: *Space-Time Reference Systems for Monitoring Global Change and for Precise Navigation*. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Band 44, Frankfurt am Main, 2010
- Oberndorfer H, Müller J: GOCE closed-loop simulation; *Journal of Geodynamics*, 33(1-2), 53-63, doi: 10.1016/S0264-3707(01)00054-0, 2002
- Pail R, Metzler B, Preimesberger T, Goiginger H, Mayrhofer R, Höck E, Schuh W-D, Alkhatib H, Boxhammer C, Siemes C, Wermuth M: GOCE Schwerefeldprozessierung: Softwarearchitektur und

- Simulationsergebnisse. *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 132(1), 16-25, 2007
- Pail R, Goiginger H, Schuh W-D, Höck E, Brockmann JM, Fecher T, Gruber T, Mayer-Gürr T, Kusche J, Jäggi A, Rieser D: Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. *Geophysical Research Letters* 37, L20314, doi: 10.1029/2010GL044906, 2010a
- Pail R, Reguzzoni M, Sansó F, Kühnreiter N: On the combination of global and local data in collocation theory. *Studia Geophysica et Geodaetica* 54(2), 195-218, doi: 10.1007/s11200-010-0010-1, 2010b
- Pail R, Bruinsma S, Migliaccio F, Förste C, Goiginger H, Schuh WD, Höck E, Reguzzoni M, Brockmann JM, Abrikosov O, Veicherts M, Fecher T, Mayrhofer R, Krasbutter I, Sansó F, Tscherning CC: First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *Journal of Geodesy*, 85(11), 819-843, doi: 10.1007/s00190-011-0467-x, 2011
- Peterseim N, Schlicht A, Stummer C, Yi W: Impact of cross winds in polar regions on GOCE accelerometer and gradiometer data; in: Ouwehand L (Hrsg.): Proceedings of the 4th International GOCE User Workshop, ESA Publication SP-696, ESA/ESTEC, ISBN (Online) 978-92-9092-260-5, ISSN 1609-042X, 2011
- Petit G, Luzum B (Hrsg.): IERS Conventions 2010. IERS Technical Note 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2010
- Plag H-P, Pearlman M: Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Springer, Berlin, 2009
- Pritsch B, Schreiber KU, Velikoseltsev A, Wells J-PR: Scale Factor Corrections in Large Ring Lasers. *Applied Physics Letters* 91(6), 061115, doi:10.1063/1.2768639, 2007
- Ramillien G, Frappart F, Cazenave A, Güntner A: Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids. *Earth and Planetary Science Letters* 235(1-2), 283-301, doi: 10.1016/j.epsl.2005.04.005, 2005
- Rothacher M: Global Geodetic Observing System (GGOS): Status and Future. AOGS 5th Annual Meeting 2008, June 16-20, 2008, Busan, Korea, 2008
- Rothacher M, Angermann D, Artz T, Bosch W, Drewes H, Boeckmann S, Gerstl M, Kelm R, Koenig D, Koenig R, Meisel B, Mueller H, Nothnagel A, Panafidina N, Richter B, Rudenko S, Schwegmann W, Seitz M, Steigenberger P, Tesmer V, Thaller D: GGOS-D: homogeneous reprocessing and rigorous combination of space geodetic observations. *Journal of Geodesy*, 85(10), 679-705, doi: 10.1007/s00190-011-0475-x, 2011
- Rummel R, Yi W, Stummer C: GOCE gravitational gradiometry. *Journal of Geodesy*, 85(11), 777-790, doi: 10.1007/s00190-011-0500-0, 2011
- Rummel R, Horwath M, Yi W, Albertella A, Bosch W, Haagmans R: GOCE, satellite gravimetry and antarctic mass transports. *Surveys in Geophysics*, 32(4), 643-657, doi: 10.1007/s10712-011-9115-5, 2011b
- Sanchez L, Seemüller W: Report of the SIRGAS Analysis Centre at DGFI. SIRGAS 2010 General Meeting. www.sirgas.org, 2010
- Savcenko R, Bosch W: EOT08a – empirical ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. DGFI Report 81, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI), München, 2008
- Schmidt M, Han S-C, Kusche J, Sanchez L, Shum CK: Regional high-resolution spatio-temporal gravity modeling from GRACE data using spherical wavelets. *Geophysical Research Letters* 33, L08403, doi:10.1029/2005GL025509, 2006
- Schmidt M, Bilitza D, Shum CK, Zeilhofer C: Regional 4-D modeling of the ionospheric electron content. *Advances in Space Research*, 42(4), 782-790, doi: 10.1016/j.asr.2007.02.050, 2008a
- Schmidt M, Seitz F, Shum CK: Regional four-dimensional hydrological mass variations from GRACE, atmospheric flux convergence, and river gauge data. *Journal of Geophysical Research* 113, B10402, 2008b
- Schmidt M, Faber O: Ellipsoidal Wavelet Representation of the Gravity Field. Report 487, OSU, Columbus, Ohio, 2008.
- Schreiber KU, Klügel T, Stedman GE: Earth tide and tilt detection by a ring laser gyroscope. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2), doi: 10.1029/2001JB000569, 2003
- Schreiber KU, Velikoseltsev A, Rothacher M, Klügel T, Stedman GE, Wiltshire DL: Direct measurement of diurnal polar motion by ring laser gyroscopes. *Journal of Geophysical Research*, 109, B06405, doi: 10.1029/2003JB002803, 2004
- Schreiber KU, Wells J-P R, Stedman GE: Noise Processes in Large Ring Lasers. *General Relativity and Gravitation* 40(5), 935-943, doi: 10.1007/s10714-007-0584-2, 2008
- Seemüller W, Sanchez L, Seitz M, Drewes H: The position and velocity solution of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS (IGS RNAAC SIR). DGFI Report No. 86, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, 2010

- Seitz F: Atmosphärische und ozeanische Einflüsse auf die Rotation der Erde – Numerische Untersuchungen mit einem dynamischen Erdsystemmodell. Deutsche Geodätische Kommission, Vol. C 578, München, 2004
- Seitz F, Schmidt M, Shum CK: Signals of extreme weather conditions in Central Europe in GRACE 4-D hydrological mass variations. *Earth and Planetary Science Letters*, 268(1-2), 165-170, 2008
- Seitz F, Drewes H: Simulation of polar motion with a dynamic Earth system model over a period of 200 years (1860-2060). In: Soffel, H. (Hrsg.) *Proceedings of the "Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2008"*, 2009
- Seitz M: Kombination geodätischer Raumb Beobachtungsverfahren zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems. DGK Reihe C 630, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2009
- Seitz M, Angermann D, Bloßfeld M, Drewes H, Gerstl M: The DGF I Realization of the ITRS: DTRF2008, *Journal of Geodesy*, 86(12), 1097-1123, doi: 10.1007/s00190-012-0567-2, 2012
- Stedman GE, Hurst RB, Schreiber KU: On the Potential of Large Ring Lasers. *Optics Communications* 279(1), 124–129, doi: 10.1016/j.optcom.2007.07.011, 2007
- Steigenberger P, Rothacher M, Dietrich R, Fritsche M, Rülke A, Vey S: Reprocessing of a global GPS network. *Journal of Geophysical Research*, 111, B05402, doi:10.1029/2005JB003747, 2006
- Stummer C, Fecher T, Pail R: Alternative method for angular rate determination within the GOCE gradiometer processing. *Journal of Geodesy* 85(9), 585-596, doi: 10.1007/s00190-011-0461-3, 2011
- Tesmer V, Steigenberger P, Rothacher M, Boehm J, Meisel B: Annual deformation signals from homogeneously reprocessed VLBI and GPS height time series. *Journal of Geodesy* 83(10), 973-988, doi: 10.1007/s00190-009-0316-3, 2009
- Völksen C: EPN Reprocessing — a new EPN Project, *Proceedings of the EUREF Symposium*, 2009
- Wang X: Time-variable gravity field determination from satellite constellations, Swarm as an example; Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, TU München, 2011
- Wermuth M, Rummel R, Földváry L: Mission simulation and semi-analytical gravity field analysis for GOCE SGG and SST; in: Flury J, Rummel, R, Reigber C, Rothacher M, Boedecker G, Schreiber U (Hrsg.) *Observation of the Earth System from Space*, pp 193-208, Springer, ISBN (Print) 978-3-540-29520-4, ISBN (Online) 978-3-540-29522-8, doi: 10.1007/3-540-29522-4\_14, 2006
- Zenner L, Gruber T, Jäggi A, Beutler G: Propagation of atmospheric model errors to gravity potential harmonics — impact on GRACE de-aliasing; *Geophysical Journal International* 182(2) 797-807, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04669.x, 2010

## Abkürzungsverzeichnis

ACES	Atomic Clock Experiment in Space
BAdW	Bayerische Akademie der Wissenschaften, München
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin
CGE	Centrum für Geodätische Erdsystemforschung
CHAMP	Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical Research and Application
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CONGO	COoperative Network for GIOVE Observation
CryoSat	Cryosphere Satellite
CTU	Czech Technical University, Prag
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München
DGK	Deutsche Geodätische Kommission, München
DOGS	DGFI Orbit and Geodetic Parameter Estimation Software
DOGS-CS	DOGS Combination and Solution Software
DOGS-OC	DOGS Orbit Computation Software
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
EDC	EUROLAS Data Center, München
EGG-C	European GOCE Gravity Consortium
EGU	European Geosciences Union
ELT	European Laser Time Transfer Project
EOP	Earth Orientation Parameters
EOT	Empirical Ocean Tide model
EPN	EUREF Permanent Network
ESA	European Space Agency
EUREF	European Reference Frame
EUROLAS	Consortium of European Laser stations
e-VLBI	Electronic VLBI
FB	Forschungsbereich
FESG	Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, TU München
FGS	Forschungsgruppe Satellitengeodäsie
Galileo	European Satellite Navigation System
GFZ	Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam
GGOS	Global Geodetic Observing System (IAG)
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
GIPSY	GNSS-Inferred Positioning System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GO	Geodätisches Observatorium
GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
GOCO	Gravity Observation Combination
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HPF	High-level Processing Facility (GOCE)
IAG	International Association of Geodesy
IAPG	Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU München
IAS	International Altimetry Service
IAU	International Astronomical Union
ICESat	Ice, Cloud, and land Elevation Satellite
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IDS	International DORIS Service
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service

IGN	Institut Géographique National, Frankreich
IGN	Instituto Geográfico Nacional de España, Spanien
IGS	International GNSS Service
ILRS	International Laser Ranging Service
INFN	Instituto Nazionale di Fisica Nucleare, Italien
InSAR	SAR Interferometrie
ISO	International Organization for Standardization
ISS	International Space Station
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IVS	International VLBI Service for Geodesy und Astrometry
KEG	Kommission für Erdmessung und Glaziologie der BADW
LAGEOS	Laser Geodynamics Satellite
LLR	Lunar Laser Ranging
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München
LOD	Length Of Day
LRO	Lunar Reconnaissance Orbiters
MDT	Mean Dynamic Topography
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NASA	National Aeronautics and Space Administration, USA
OCCAM	VLBI-Auswerteprogramm
PHARAO	Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
QUEST	Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research, Hannover
QZSS	Quasi Zenith Satellite System
RNAAC-SIR	Regional Network Associate Analysis Center for SIRGAS
RNAAC-EUREF	Regional Network Associate Analysis Center for EUREF
RTW	Radioteleskop Wettzell
SAR	Synthetic Aperture Radar
SARAL	Satellite with Argos and AltiKa
SINS	Strapdown Inertial Navigation System
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
SLR	Satellite Laser Ranging
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity Satellite
SOS-W	Satellite Observing System Wettzell
SST	Satellite-to-Satellite Tracking
SVN	Apache Subversion
SWOT	Surface Water Ocean Topography Mission
T2L2	Time Transfer by Laser Link
TanDEM-X	TerraSAR-X-Add-on for Digital Elevation Measurements
TerraSAR-X	Deutscher Erdbeobachtungssatellit
TIGA	GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring
TRF	Terrestrial Reference Frame
TTW	TWIN Radioteleskop Wettzell
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
UoC	University of Canterbury, Christchurch, Neuseeland
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WLRS	Wettzell Laser Ranging System









ISSN 2195-7126

ISBN 978-3-934205-32-1