

Forschungsgruppe Satellitengeodäsie

FGS



Forschungs- und Entwicklungsprogramm
2021-2025

München, Frankfurt, Bonn

Oktober 2022

FGS Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2021-2025

Zusammenfassung

Veränderungsprozesse im System Erde wie etwa der Anstieg des mittleren Meeresspiegels stellen eine große gesellschaftliche Herausforderung dar. Zu deren Bewertung ist ein detailliertes Verständnis der Prozesse in und der Wechselwirkung zwischen den Komponenten des Systems Erde unabdingbar. Grundlage hierfür sind präzise Messungen in einheitlichen, präzisen und langzeitstabilen geometrischen und gravimetrischen Referenzsystemen. Mit den raumgeodätischen Messverfahren, den Altimeter- und Schwerefeld-Satellitenmissionen, mit präzisen terrestrischen Verfahren sowie mit den entsprechenden Datenverarbeitungs- und Analysemethoden liefert die Geodäsie das instrumentelle und methodische Rüstzeug zur Schaffung der metrologischen Basis für die Erfassung, Beschreibung und Interpretation dieser Prozesse.

Eine zentrale Rolle bei der Realisierung dieser metrologischen Grundlage spielen global verteilte geodätische Fundamentalstationen wie das Geodätische Observatorium Wettzell. Alle wichtigen Weltraum- und terrestrischen Verfahren werden dort im Rahmen der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) an einem Ort betrieben. Neben der langfristigen Sicherstellung des Betriebs des Observatoriums und dessen systematischen Weiterentwicklung basierend auf dem aktuellsten wissenschaftlich-technischen Wissensstand ist die geodätische Nutzung der Messdaten und die Weiterentwicklung der entsprechenden Methoden und Modelle, aber auch die Interpretation der Resultate in enger Zusammenarbeit mit den verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen im Fokus der Forschung der FGS.

Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2020-2025 gliedert sich in drei thematische Schwerpunkte:

1. **Infrastruktur:** Kernaufgabe ist die kontinuierliche Erfassung und Bereitstellung hochwertiger, konsistenter und ununterbrochener geodätischer Messzeitreihen. Zur weiteren Steigerung der Qualität und Produktivität werden neue Technologien und Beobachtungsmethoden eingesetzt sowie Umgebungsparameter konsequent erfasst. Ein Schwerpunkt des Forschungsprogramms ist weiterhin die Realisierung und Nutzung einer kohärenten Zeitbasis aller Messverfahren am Observatorium.
2. **Methodik, Analyse, Modellbildung:** Ein signifikanter Anteil der Arbeiten zielt auf die Weiterentwicklung der Modellbildung und Standardisierung ab, wobei der konsistente integrierte Raumbezug durch die Kombination geometrischer und gravimetrischer Verfahren und Analysemethoden im Vordergrund steht. Dabei spielt die hochgenaue Modellierung des statischen und zeitvariablen Schwerefeldes eine zentrale Rolle. Im Fokus stehen ebenso die Erforschung und Modellierung der Komponenten des Systems Erde sowie der komplexen Wechselwirkung zwischen den Subsystemen.
3. **Produkte, Anwendungen, Internationale Zusammenarbeit:** Neben der Ermittlung von Strategien zur Erzeugung geodätischer Datensätze höchster Genauigkeit und Konsistenz gehört zu den Zielen der FGS die Überführung von Forschungsergebnissen in operationelle Systeme, um Zeitreihen von Parametern kontinuierlich und automatisiert verfügbar zu machen und nutzerfreundlich aufzubereiten. Wie bisher engagiert sich die FGS nachdrücklich in den wissenschaftlichen Diensten, Gremien und Arbeitsgruppen der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) und anderer internationaler Organisationen.

1. Einführung

1.1 Kontext der Arbeiten der FGS

Veränderungsprozesse im System Erde stellen eine große gesellschaftliche Herausforderung dar. Aufgrund anthropogener Einflüsse ändert sich das Klima schneller als jemals zuvor. Gletscher schmelzen ab, der Meeresspiegel steigt an, Klimazonen und Wasserressourcen verschieben sich, Permafrostböden tauen auf. Die Politik ist gefordert, Strategien zum Umgang mit dem globalen Wandel und zum Schutz vor Naturgefahren zu entwickeln.

Unabhängig hierzu ist ein detailliertes Verständnis der Prozesse im System Erde und der komplexen Wechselwirkungen zwischen dessen Teilsystemen. Dieses kann nur auf der Grundlage präziser Messung und Modellierung von Massen- und Energieflüssen in und zwischen den Systemen gebildet werden. Hier spielt die Geodäsie eine bedeutende Rolle. Die geodätischen Raumverfahren spielen eine Schlüsselrolle bei der Bereitstellung der metrologischen Basis – des hochpräzisen und langzeitstabilen globalen Referenzrahmens – zur Messung von Veränderungen auf allen Zeit- und Raumskalen. Satellitenmissionen erlauben es, Massentransporte im System Erde global und kontinuierlich aus dem Weltall zu messen.

Die Aufgabe der Geodäsie beschränkt sich dabei nicht auf die Messdatenerfassung, Langzeitarchivierung und Bereitstellung hochwertiger Langzeitmessreihen und die Datenanalyse sondern erfordert ein Zusammenspiel vieler Aufgaben, die Weiterentwicklung der Messtechnologien und neuartiger Messtechniken, welche die Methodenentwicklung zur konsistenten integrierten Kombination, die Koordinierung globaler Messprogramme, sowie, in Zusammenarbeit mit Geophysik, Glaziologie, Ozeanographie, Hydrologie, Meteorologie und anderen Geowissenschaften, die Modellierung und Interpretation umfassen.

Die FGS deckt mit der Expertise der beteiligten Partner die gesamte Prozesskette von der Messung über die Analyse bis zur Interpretation im Kontext der Erdsystemforschung. Sie committet sich, hochwertige geodätische Zeitserien und Produkte nachhaltig bereitzustellen und engagiert sich bei der Verbesserung der vorhandenen und Implementierung neuartiger Messtechniken, bei der Weiterentwicklung der Analyse- und Kombinationsmethoden sowie durch die Übernahme von Aufgaben und Leitungspositionen in den internationalen Diensten. Aus diesem Selbstverständnis und Commitment der FGS leitet sich deren Forschungs- und Entwicklungsprogramm ab.

Vision

Die FGS trägt federführend zur kontinuierlichen und langfristigen Realisierung des konsistenten integrierten Raum-Zeit-Bezugs als Grundlage für die Erforschung des Systems Erde bei und spielt eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung und Nutzung neuester geodätischer Weltraumtechnologien.

Mission

Die FGS betreibt das Geodätische Observatorium Wettzell (GOW), entwickelt innovative Beobachtungstechnologien und setzt diese im internationalen Zusammenspiel im Rahmen eines systematischen Ausbaus des GOW um. Sie entwickelt im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte methodisch-theoretische Grundlagen zur Analyse, Kombination und Interpretation der Messzeitreihen und leitet, basierend auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen, daraus verbesserte konsistente und hochwertige geodätische Produkte ab. Diese werden über die wissenschaftlichen Dienste der IAG der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. Sie gestaltet dadurch die inter-

nationalen Aktivitäten und den wissenschaftlichen Fortschritt zur Realisierung des integrierten Raum-Zeit-Bezuges als Grundlage der geodätischen Erdsystemforschung sowie für Positionierungs- und Navigationsanwendungen entscheidend mit.

1.2 Beiträge der FGS Partner zum Forschungs- und Entwicklungsprogramm

Die Aufgaben der FGS – der Betrieb Wettzell und Erfassung hochwertiger Messzeitreihen, die Weiterentwicklung der Mess- und Beobachtungstechniken und der theoretisch-methodischen Grundlagen, die problem- und zeitgerechte Nutzung der Beobachtungsdaten und die Einbindung in nationale und internationale Forschungsaufgaben – sind in der FGS Vereinbarung vom 1. Juli 1983 festgehalten. Auf deren Grundlage erstellen die FGS Partner gemeinsam das Forschungsprogramm und richten ihre Forschungsschwerpunkte danach aus. Die Forschung an den beteiligten Institutionen ist damit Forschung im Rahmen der FGS, sobald sie zum FGS Forschungsprogramm beiträgt. Infrastrukturmaßnahmen und Kernaufgaben, die in direktem Zusammenhang mit dem Betrieb und der Weiterentwicklung der Observatorien der FGS stehen, sind über die Haushalte des BKG und der FESG gesichert. Für weitergehende Projekte werben die Partner Forschungsmittel ein, die Durchführung einzelner Projekte steht daher unter dem Vorbehalt der Finanzierung durch Drittmittel.

1.3 Veränderungen in der FGS

Seit 2019 ist Prof. Paul Becker Nachfolger von Prof. Hansjörg Kutterer als Präsident des BKG. Mit der Ausweitung des Betriebs am Geodätischen Observatorium Wettzell durch das BKG wurden neue Aufgaben wie die Messung des solaren Strahlungsflusses nach Wettzell gebracht, es konnte aber auch das Personal signifikant aufgestockt werden. Einige der neuen Aufgaben wie das Monitoring der Sonnenaktivität im Kontext des Weltraumwetters oder die lokale Korrelation von VLBI Daten werden als originäre FGS-Aufgaben gesehen und finden sich daher im Forschungs- und Entwicklungsprogramm. Parallel zur Ausweitung des Betriebs wurden Teile der Infrastruktur in Wettzell in eine kritische Infrastruktur überführt. Dadurch kann der Betrieb des Observatoriums auf lange Zeit gesichert werden.

Mit der Pensionierung von Axel Nothnagel im September 2019 ist zunächst ein wesentliches Standbein im Bereich VLBI am Institut für Geodäsie und Geoinformation an der Universität Bonn für die FGS weggebrochen. Operationell ist es mit dem Aufbau von zusätzlicher Korrelationskapazität und entsprechendem Know-how in am Geodätischen Observatorium Wettzell sowie über Verträge des BKG mit dem Korrelatorteam in Bonn gelungen, die Kompetenz der FGS in diesem Themenbereich zu sichern. Das IGG trägt derzeit als FGS Partner verstärkt im Bereich von Antennen und Multipath-Problematik zum Forschungsprogramm bei. Darüber hinaus hat sich das IGG entschieden, die bisherigen Kompetenzen deutlich breiter aufzustellen. Die neue W3 Professur "Geodätische Raumverfahren" befindet sich im Besetzungsverfahren und bietet weitere Optionen für eine starke Beteiligung im FGS Programm.

2019 wurde die Geodäsie an der TUM in die neu gegründete Fakultät für Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie in ein für die Münchener FGS-Partner sehr gut passendes Umfeld eingegliedert. Das Geodätische Observatorium Wettzell wird auch von der neuen Fakultät als Asset gesehen, wie die Pressemitteilung der TUM zur Gründung der neuen Fakultät mit einem Bild der Twin-Teleskope zeigt. 2021 ist die neue Fakultät schließlich in der neuen

School of Engineering and Design aufgegangen. Auch über diese neue Organisationsstruktur ist die Finanzierung der FESG und damit der Beitrag der TUM zum Betrieb des Geodätischen Observatoriums Wettzell weiterhin gesichert.

1.4 Rückblick auf das FGS Forschungs- und Entwicklungsprogramms 2016-2020

Da FGS Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2016-2020 welches im Juni 2015 begutachtet wurde, war in drei thematische Schwerpunkte gegliedert – Raumbezug, Monitoring geophysikalischer Prozesse, Infrastruktur –, welchen jeweils zwei übergeordneten Ziele zugeordnet waren. Im Folgenden soll eine kurze Bilanz zum Stand der Arbeiten und der erreichten Ziele im Vergleich zum Programm gezogen werden. Die Forschungsarbeiten sind durch insgesamt 375 Publikationen im Berichtszeitraum 2016-2020 dokumentiert (davon 244 referierte Beiträge). Zudem wurden 50 (davon 26 referierte) Publikationen 2015 im Zeitraum nach der Begutachtung veröffentlicht. Seit Beginn 2021 sind 53 Publikationen (davon 40 referierte) entstanden. Insgesamt wurden seit der letzten Begutachtung 21 Dissertationen abgeschlossen, davon 2 in der zweiten Jahreshälfte 2015 sowie 4 seit Beginn 2021. Insgesamt kann eine positive Bilanz gezogen werden.

Schwerpunkt 1: Raumbezug

Übergeordnete Ziele des Schwerpunktes waren die Sicherung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Einzelverfahren sowie die Weiterentwicklung der Modellbildung und Standardisierung für einen konsistenten integrierten Raumbezug durch Kombination von Geometrie und Gravimetrie.

Die GGOS Konformität des Geodätischen Observatoriums wurde weiter erhöht. Kritische Fragen betreffend lokaler Vermessung und der Integration des Schwerefeldes in die Lokalnetz-Auswertung wurden im Rahmen des Euramet Projektes GeoMetre und durch eine Lotabweichungs-Kampagne mit dem Q-Daedalus-System adressiert. Das gemeinsame Referenzziel wurde realisiert und erste Tests wurden durchgeführt. Für den Einsatz im Routinebetrieb sind jedoch weitere Entwicklungen erforderlich.

An den an der FGS beteiligten Institutionen wurden eine Vielzahl von Projekten durchgeführt zur konsistenten Verknüpfung der Raumverfahren. Zu nennen ist hier zuerst die DFG Forschergruppe Referenzsysteme, zu welcher alle Mitglieder der FGS maßgebliche Beiträge geleistet haben. Projekte haben die Realisierung konsistenter Bezugsrahmen und die Verknüpfung mit dem Schwerefeld – z.B. durch Bestimmung von Schwerefeldparametern aus Multi-SLR-Lösungen – wie auch von Epochenreferenzrahmen untersucht, das Potenzial ausgelotet der Kolokation der Messverfahren am Boden – beispielsweise über Troposphärenparameter – und im Weltraum – durch Nutzung der GNSS-SLR- sowie zukünftiger GNSS-VLBI-Verknüpfungen auf GNSS Satelliten. Im Rahmen eines ESA Projektes wurden Konzepte und Algorithmen zur raschen Bereitstellung konsistenter und präziserer EOP-Zeitreihen aus VLBI, GNSS und SLR-Beobachtungen entwickelt. Weiterentwickelt wurden Methoden zu optimal kombinierten regionalen Geoidmodellen z.B. zur Realisierung von Höhensystemen in Entwicklungsländern. Durch Verbesserung der Strahlungsdruckmodelle für GNSS Satelliten inklusive der Modellierung thermischer Abstrahlung konnten die Bahnen der neuen GNSS Konstellationen signifikant verbessert werden. Untersucht wurde ebenfalls die Nutzung hochstabiler Uhren in der Satellitennavigation sowie die Nutzung von Intersatellitenlinks zur GNSS-Bahnbestimmung. Die Nutzung der Polarisation in der SLR-Entfernungsmessung wurde jedoch zurückgestellt.

Ein DFG-Projektantrag zur Untersuchung des potentiellen Beitrags von absolutem SAR zur Realisierung globaler Bezugssysteme wurde leider zweimal abgelehnt.

Relativistische Konzepte wurden im Oktober 2018 anlässlich eines Workshops diskutiert, der im Rahmen der Leitung des ESA Topical Teams "Geodesy, Clock, Time Transfer" aus der FGS an der TUM organisiert wurde.

Schwerpunkt 2: Monitoring geophysikalischer Prozesse

Zum Monitoring der neutralen Atmosphäre an GOW wurden zusätzliche Sensoren installiert. Es hat sich gezeigt, dass bistatische SLR-Systeme wie das SOS-W für atmosphärische LIDAR-Messungen zur Erfassung von thermodynamischen Zustandsgrößen nicht geeignet sind. Turbulenzeffekte wurden aus VLBI-Beobachtungen geschätzt. Fluktuationen im Wasserdampfgehalt befinden sich im Grenzbereich des derzeitigen instrumentellen Rauschens. Das hydrologische Messnetz am GOW wird in Kooperation mit der Sektion "Hydrologie" des GFZ Potsdam operationell weiterbetrieben.

Im Bereich der Schwerefeldbestimmung mit Satelliten wurden eine Vielzahl von Arbeiten fortgeführt. Die Methodik für die globale und skalenübergreifende Kombination von terrestrischen und Schwerefelddaten wurde weiterentwickelt. Dies umfasst die Generierung hochauflösender Schwerefeldmodelle mit voller Varianz-Kovarianzinformation wie der Multiskalendarstellung regionaler Schwerefeldmodelle und Arbeiten zur Vereinheitlichung globaler Höhensysteme. In Hinblick auf zukünftige Schwerefeldmissionen wurden z.B. im Rahmen des ESA Earth Explorer 10 Programms neuartige Konzepte simuliert und vorgeschlagen. Gegenwärtig laufen ESA-Studien zu MAGIC als Schwerefeldmission der nächsten Generation.

Im Bereich des Monitorings von Deformationsprozessen kann die Installation des DFG Graduiertenkollegs UPLIFT durch TUM und LMU zur geophysikalischen Modellierung vertikaler Bewegungsprozesse mittels geodätischer und geologischer Beobachtungen, aber auch detaillierte Untersuchungen zu geophysikalischen Effekten im Rahmen der Forschergruppe Referenzsysteme erwähnt werden. Auch Altimetrie war in der Berichtsperiode ein Schwerpunkt. Insbesondere wurde die Ozeanaltimetrie deutlich ausgebaut, vor allem in Hinblick auf Küstenanwendungen und Polargebiete. Zur globalen und regionalen Bestimmung von Ionosphärenparametern kann die Entwicklung des operationellen Systems OPTIMAP zur Vorhersage von Ionosphärenparametern unter Einbindung des Weltraumwetters hervorgehoben werden.

Schwerpunkt 3: Infrastruktur

Die kontinuierliche Bereitstellung hochwertiger Beiträge der Messsysteme am Geodätischen Observatorium Wettzell ist eine Kernaufgabe und hat die höchste Priorität. Durch dauerhafte Inbetriebnahme eines DORIS-Beacons ist das GOW seit 2016 eine Viertechnik-Ko-lokationsstation. Die geodätische VLBI wurde in Hinblick auf VGOS kontinuierlich weiterentwickelt. Die Twin-Teleskope sind mittlerweile im Produktionsbetrieb und beteiligen sich regelmäßig an VGOS-Sessions wie auch an Routine-Sessions des IVS. Gemeinsame Beobachtungen zweier der Radioteleskope wurden in mehreren Sessions erfolgreich korreliert. Technische Probleme bei der Integration der hochpräzisen lokalen Zeitverteilung haben jedoch bisher Common-Clock-Experimente mit mehreren der Radioteleskope verhindert. Aufgrund des erforderlichen Aufwands wurde die Aufrüstung der Twin-Teleskope zu einem Combined Element Interferometer nicht weiterverfolgt. Die Nutzung von Ka-Band-Beobachtungen wurde untersucht, für operationelle Aufgaben

kann Ka-Band allerdings nicht genutzt werden. Nicht abgeschlossen ist die Entwicklung eines Fortführungskonzeptes für das RTW. In einer Voranalyse wurde der Aufwand zur Aufrüstung des Großgeräts auf Breitband abgeschätzt. Ein lokaler Korrelator wurde aufgebaut und ist im Einsatz.

Im Berichtszeitraum konnten auch das SOS-W in den routinemäßigen Messbetrieb überführt werden. Am WLRS werden Echos vom Mond gemessen und fließen in die Analyse ein, für einen effizienten LLR-Betrieb sind jedoch noch weitere Verbesserungen am WLRS erforderlich. Für den sicheren Betrieb wurde ein IR-Kamerasystem zur Überwachung des Luftraumes installiert. Seit 2020 werden die SLR- und VLBI-Teleskope gemeinsam aus dem neuen Twin-Kontrollraum gesteuert. Die Ablaufplanung an den SLR Systemen sowie der Messbetrieb der Radioteleskope läuft autonom mit durch zusätzlich installierter Sensorik garantierter Sicherheit für Mensch und Maschine.

Der Beitrag des Geodätischen Observatoriums Wettzell zur internationalen Atomzeit ist eine Daueraufgabe und Mitarbeiter nehmen regelmäßig an den Treffen der UTC Labore in Deutschland teil. Das neue, auf kompensierten Glasfasern beruhende optische Zeit- und Frequenzverteilsystem wurde realisiert und testweise in Betrieb genommen. Die rein optische Anbindung der Laserdistanzmessung an das optische Zeitverteilsystem wird im Rahmen eines DFG-Projektes untersucht. Ein allgemeines Referenzziel zur Identifikation von Signallaufzeitfehlern in den VLBI- und SLR-Messsystemen wurde installiert und erfolgreich getestet. In Erwartung des Starts von ACES sind umfangreiche Vorbereitungen für das ELT Laser-Zeitübertragungsexperiment erfolgt. Erste Simulationen im Kontext einer zukünftigen Anbindung des GOW an eine optische Referenzuhr bei der PTB wurden im Rahmen der Beteiligung am H2020 CLONETS-DS Infrastrukturprojekt durchgeführt.

Seit der Implementation einer Rückstreckkorrektur und der Reduzierung der Langzeitdrifts der Tiltmeter läuft der G-Ringlaser stabil und liefert lange und ungestörte Messzeitreihen. Ein SINEX-Output wurde in das Ringlaser-Analyseprogramm implementiert, Tests zur Kombination mit GNSS und VLBI stehen allerdings noch am Anfang. Das Potential alternativer Laser-Wellenlängen wurde an Ringlasern in Christchurch erprobt, und in Fürstenfeldbruck wurde der ROMY-4-Komponenten Ringlaser mit maßgeblicher Unterstützung der FESG aufgebaut und in Betrieb genommen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Stabilität des G-Ringlasers jene der H-Maser nur im Kurzzeitbereich übertrifft, er daher als hochstabile Frequenzquelle für die VLBI nicht geeignet ist.

Eine gravimetrische Referenzstation wurde am Geodätischen Observatorium Wettzell realisiert. Ein Quantengravimeter wurde beschafft und am GOW in Betrieb genommen und getestet.

Wie auch in der vorangegangenen Berichtsperiode beteiligen sich Exponenten der FGS aktiv an den Diensten der IAG, so etwa im IAG Executive Committee und IERS Directing Board, aber auch als IVS-Kombinationszentrum. Das IERS Central Bureau wird aus der FGS geleitet, der Chair des IVS Directing Boards wurde bis 2021 aus der FGS gestellt. Datenzentren des IVS, ILRS und IGS werden aus der FGS betrieben. Auch an GGOS beteiligt sich die FGS intensiv, durch Leitung mehrerer Focus Areas und Working Groups, durch Mitarbeit im GGOS Science Panel. Im Rahmen des Betriebs des GGOS Bureaus for Standards and Conventions wurde eine Inventur der Standards und Konventionen, welche innerhalb der Geodäsie verwendet werden, erstellt und publiziert sowie Empfehlungen zur Verbesserung der Konsistenz der IAG Produkte formuliert. Zudem wurde intensiv am Aufbau der GGOS Webseiten mitgearbeitet.

1.5 Das FGS Forschungs- und Entwicklungsprogramm 2021-2025

Ziele des Forschungs- und Entwicklungsprogramms 2021-2025 der FGS schließen sich an jene des letzten Forschungsprogramms 2016-2020 an. Zentral ist weiterhin die Sicherung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Einzelverfahren und Weiterentwicklung der Messtechniken und Infrastruktur mit Fokus auf die geodätischen Observatorien, die von der FGS betrieben werden. Im Fokus steht dabei auch das Monitoring von Veränderungsprozessen in der lokalen Umgebung. Schwerpunkte bleiben die Verbesserung des Raumbezugs durch konsistente Kombination der geometrischen Beobachtungsverfahren sowie die Weiterentwicklung und Standardisierung zur Realisierung eines konsistenten integrierten Raumbezugs durch die Kombination geometrischer und gravimetrischer Verfahren und Analysemethoden. Am Ende der Prozesskette steht die Erforschung und Quantifizierung geophysikalischer Prozesse im Erdsystem in Kooperation im geowissenschaftlichen Umfeld, aber auch die Aufbereitung und Ableitung hochwertiger geodätischer Produkte und Überführung der Forschungsergebnisse in operationelle Systeme. Wie im letzten Programm spielt auch im neuen Forschungsprogramm die Nutzung neuer Sensorik und kohärenter Zeit an allen Messsystemen am Observatorium eine herausragende Rolle, eingebettet auch in einen laufenden Antrag für eine DFG-Forschungsgruppe zum Thema Uhrenmetrologie in der Geodäsie, der am 27.09.2022 an einer Begutachtung vor Ort sehr gut bewertet wurde. Verstärkt soll in der neuen Programmperiode auch in Entwicklungen zur Simulation von geodätischen Beobachtungssystemen und Satellitenmissionen investiert werden. Und selbstverständlich ist, dass die FGS sich weiter federführend in internationalen wissenschaftlichen Organisationen und Services beteiligt.

Das vorliegende Programm ist wiederum in drei Schwerpunkte gegliedert: "Infrastruktur" – "Methodik, Analyse, Modellbildung" – "Produkte, Anwendungen, Internationale Zusammenarbeit". Diese bilden die gesamte Prozesskette der FGS ab. Im Vergleich zum letzten Programm sind die Schwerpunkte jedoch etwas anders strukturiert, um klar hervorzuheben, dass im Zentrum der Arbeiten das Geodätische Observatorium Wettzell als fundamentale geodätische Infrastruktur steht. Die einzelnen Forschungsschwerpunkte sind in Objectives gegliedert, welchen wiederum Forschungsziele zugeordnet sind, die schließlich durch konkrete Aufgaben erreicht werden sollen. Für den zweiten und dritten Schwerpunkt ist jeweils aufgeführt, welche der FGS-Partner diese Aufgaben maßgeblich bearbeitet (APG: Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie, SGD: Professur für Satellitengeodäsie). Die Aufgaben im ersten Schwerpunkt "Infrastruktur" sind dem Geodätischen Observatorium Wettzell zugeordnet, um zu verdeutlichen, dass diese durch das Team am Observatorium bearbeitet werden, bestehend aus BKG- und FESG-Mitarbeitern und unterstützt durch beide Institutionen. Diese Aufgaben sind maßgeblich über Haushaltsmittel der beiden Institutionen finanziert.

2. Forschungsprogramm

2.1 Infrastruktur

Eine zentrale Aufgabe der FGS stellt die kontinuierliche Bereitstellung von Produkten dar, welche die Grundlage zur Realisierung eines globalen Raumbezugs bilden. Das Rückgrat der Messungen bildet das Geodätische Observatorium Wettzell (GOW) mit seiner weltweit einmaligen Ausstattung an geodätischen Raummesssystemen. Sowohl das 20-m-Teleskop RTW als auch das neue TWIN-Teleskop 1 („Wettzell Nord“) nehmen am operationellen Beobachtungsprogramm des IVS zur Bestimmung der Erdorientierungsparameter und des terrestrischen Referenzrahmens teil. Das zweite TWIN-Teleskop („Wettzell Süd“) partizipiert im VGOS Pilotprogramm, wo das Potenzial der neuen Teleskoptypen ausgeschöpft und den GGOS Spezifikationen bestmöglich Rechnung getragen wird. Wichtige Teile des Automatisierungsprogramms wurden in die Praxis übertragen und stellen die Beobachtungstätigkeit auf solide Beine. Auch im SLR-Bereich wird die Produktivität weiter erhöht. Durch den zunehmenden Grad der Automatisierung werden am GOW mittlerweile beide SLR-Systeme simultan betrieben, und durch technische Neuerungen konnte die Repetitionsrate am WLRS drastisch auf 400 Hz erhöht werden. Zukünftige Weiterentwicklungen zielen vor allem auf die Identifizierung und Beseitigung systematischer Fehler und auf eine Optimierung der Beobachtungsplanung.

Daneben liefern die Observatorien AGGO in Argentinien und O'Higgins in der Antarktis wertvolle Beiträge zur Verdichtung und Homogenisierung der internationalen Messnetze auf der Südhemisphäre. Nach dem Umzug nach La Plata ist AGGO wieder weitgehend in Betrieb und das Radioteleskop in Routinebeobachtungen eingebunden. Die zeitnah vorgesehene Übergabe des Betriebs von AGGO an den argentinischen Partner wurde um mehrere Jahre verschoben, der Betrieb des AGGO konnte aber vertraglich um weitere 10 Jahre gesichert werden. Mittelfristig ist eine Ergänzung durch ein VGOS-Teleskop angedacht, um den Anforderungen an zukünftige Messprogramme gerecht zu werden. O'Higgins ist aufgrund der konsequenten Umsetzung eines Remote-Control-Betriebs mittlerweile stärker in internationale Beobachtungsprogramme eingebunden.

Die Infrastruktur der FGS liefert durch die umfangreiche Erfassung von Umweltparametern auch einen wichtigen Beitrag zum Verständnis und zur Quantifizierung regionaler Prozesse. Die Atmosphärensondierung oder die Erfassung hydrologischer Kenngrößen stellen auch in Zukunft die Basis für geeignete Korrekturmodelle dar. Der Aufbau eines Solar Flux Teleskops und die geplante Installation von GNSS-Szintillationsempfängern liefern neue Beobachtungsgrößen, um den Einfluss der Ionosphäre bzw. des Weltraumwitters auf geodätische Produkte zu korrigieren. Durch die konsequente Umsetzung und Nutzung neuer Technologien fördert die FGS innovative Entwicklungen, die auch auf andere geodätische Beobachtungsstationen ausstrahlen. Das gilt insbesondere auch für die optische Zeitübertragung, die eine Schlüsseltechnologie für die Beseitigung systematischer Messfehler darstellt und durch Einführung einer kohärenten Zeitbasis eine weitere Steigerung der Messgenauigkeit bis hin zur Nutzung der Zeit als zusätzliche geodätische Observable ermöglicht.

Objective 1. Kontinuierliche Erfassung und Bereitstellung hochwertiger Messzeitreihen hoher Konsistenz

Die beständige Weiterentwicklung der Messeinrichtungen in Hinblick auf Automatisierung und intelligente Fehlerbehandlung erhöhen die Bereitschaftszeit und Zuverlässigkeit der Systeme. Ziel ist ein weitgehend autonomer Betrieb der VLBI- und SLR-Systeme, um die zunehmende Beobachtungslast mit dem vorhandenen Beobachtungspersonal durchführen zu können. Die Tätigkeiten in Wettzell werden um die Koordination, die Detailplanung („Scheduling“) und die Korrelation geodätischer Messungen erweitert, so dass in der FGS Expertise für die gesamte Prozesskette der VLBI (Planung - Beobachtung - Korrelation - Analyse) erlangt bzw. beibehalten wird. Die Observatorien AGGO und O'Higgins werden als integrale Netzbestandteile weiterentwickelt. Auf dem AGGO überführen wir das SLR-System in den Routinebetrieb und planen die Errichtung eines VGOS-Teleskops. In O'Higgins steht eine Verbesserung des Empfangssystems und der allgemeinen Instandhaltung vor dem Hintergrund eines nur etwa 4-wöchigen Wartungsaufenthaltes pro Jahr im Vordergrund. Ziel ist eine höhere Verfügbarkeit und eine bessere Integration in die Messprogramme des IVS.

Im SLR-Bereich sind verschiedene Maßnahmen zur Optimierung vorgesehen, die vor allem eine Steigerung der Messgenauigkeit zum Ziel haben. Das betrifft vor allem die Atmosphäre, wo Effekte der Dispersion und Szintillation untersucht werden. Hierzu sollen auch Zweifarbenmessungen bei den Lasersystemen am GOW und bei AGGO verstärkt eingesetzt werden. Auch Untersuchungen zu den Reflexionseigenschaften der Satelliten sind vorgesehen. Beispielsweise sind SLR-Messungen zu Satelliten mit unbeschichteten Retroreflektoren von der Polarisation abhängig. Dieser Effekt soll bei Galileo Satelliten anhand von SLR-Messungen mit drehbarer Polarisationsrichtung systematisch untersucht werden. Für Entfernungsmessungen zum Mond, die in den vergangenen Jahren in Wettzell wieder mit Erfolg durchgeführt wurden, sind Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz vorgesehen. Nach der Überführung des AGGO SLR Systems in den Routinebetrieb soll auch hier die Möglichkeit von Mondmessungen geprüft werden. Bei allen diesen Untersuchungen ist die enge Kooperation zwischen Beobachtungs- und Analysesegment innerhalb der FGS von großem Vorteil.

Die im Rahmen der FGS betriebenen Absolutgravimeter tragen wesentlich zur Erhaltung des nationalen Schwerestands bei. Systematische Untersuchungen des Fehlerhaushalts und daraus abgeleitete technologische Verbesserungen sichern langfristig die hohe Qualität des Schwerestands. Dazu dienen auch regelmäßig stattfindende, internationale Vergleichsmessungen. Das GOW hat sich dabei mittlerweile als Vergleichs- und Referenzstation für Absolutgravimeter in Europa etabliert.

Objective 2. Detaillierte Erfassung und Modellierung regionaler Prozesse und Umweltparameter

Zum besseren Verständnis und Interpretation der geodätischen Messungen werden auf den Observatorien zusätzlich Parameter erfasst. Für den Nachweis der lokalen Stabilität der Referenzpunkte und deren Vernetzung dient das terrestrische Vermessungsnetz, das in regelmäßigen Abständen eingemessen wird. Optimierungen in der Netzausgleichung einschließlich der Berücksichtigung von Schwerefeldgrößen sowie eine verbesserte Refraktionskorrektur sollen die Genauigkeit der "Local Ties" weiter steigern. Der Einsatz eines gemeinsamen Kollokationspunktes ("Common Target") dient dabei als

raumzeitliche Referenz bei der Herleitung von Inter-Technik Ties. Unterstützend für die präzise Positionierung und für das Deformationsmonitoring werden zunehmend auch SAR-Reflektoren eingesetzt.

Für die Herleitung hydrologischer Korrekturzeitreihen für die Gravimetrie wird die Erfassung hydrologischer Parameter an den Observatorien Wettzell und AGGO in Zusammenarbeit mit dem GFZ Potsdam weitergeführt.

Mit steigenden Anforderungen an die Genauigkeit geodätischer Produkte nimmt auch das Atmosphärenmonitoring einen immer größeren Raum ein. Die in den vergangenen Jahren beschaffte und getestete Sensorik wie Radiometer, Temperaturprofiler oder Lidar wird zunehmend in den Betrieb integriert. Mit dem Aufstieg von Radiosonden für die vertikale Sondierung der Atmosphäre wurden erste Erfahrungen gesammelt, ein Beobachtungskonzept für den regelmäßigen Einsatz soll erstellt werden. Zur Erweiterung der flächenhaften Informationen ist vorgesehen, die in der Umgebung des GOW angesiedelten Footprint-Stationen mit einer Klimastation zu versehen. Für die atmosphärische Korrektur von Gravimeterzeitreihen im Nahfeld soll zusätzlich die Möglichkeit der flächenhaften Erfassung des Luftdrucks mit Kleinstsensoren geprüft werden.

Die quantitative Erfassung des Einflusses der Ionosphäre bzw. des Weltraumwetters auf geodätische Produkte soll neben der Mehrfrequenzmessung im Bereich VLBI und GNSS auf weitere Beobachtungsgrößen ausgedehnt werden. Das Solar Flux Teleskop trägt durch die Messung der Strahlungsintensität bei 2,8 GHz zur Bestimmung des Solar Flux Index bei. Diese wesentliche Antriebsgröße liegt vielen Ionosphärenmodellen zu Grunde und trägt zur Vorhersage von ionosphärischen Störungen durch den Sonnenwind bei. Die Szintillationsempfänger quantifizieren die in der Satellitennavigation gefürchteten abrupten ionosphärischen Fluktuation in der Amplitude und Phase von GNSS-Signalen.

Objective 3. Neue Technologien und Sensoren und ihre konsequente Nutzung

Die umfangreiche Messinfrastruktur und zugehörige Expertise wird von der FGS auch genutzt, um neue Beobachtungsprogramme und neue Technologien zu entwickeln, zu erproben und zu nutzen. Mit dem lokalen Array aus drei Radioteleskopen am GOW können besondere Experimente durchgeführt werden, um z.B. die Einflüsse der Uhren ("Common-Clock Experimente") oder der Atmosphäre systematisch zu untersuchen. Für das RTW wird ein Umbau- und Nutzungskonzept entwickelt, um die große Empfangsfläche für spezielle Experimente optimal nutzen zu können. Weiterhin sind Sonderbeobachtungsprogramme wie Messungen im Ka-Band oder Messungen von Satelliten mit VLBI, GNSS und SLR für die Kollokation im Orbit vorgesehen. Mit den drei SLR-Stationen WLRS, SOSW und AGGO sollen neue Beobachtungsstrategien im Verbund entwickelt und getestet werden, um mit dem derzeitigen globalen Stationsnetz der steigenden Zahl von Satellitenmissionen gerecht zu werden. Weitere interessierte SLR-Stationen könnten dann ins Konzept integriert werden.

Die FGS verfügt mit dem Ringlaser G in Wettzell und ROMY in Fürstenfeldbruck nach wie vor über die einzigen beiden Ringlaser für Erdrotationsmonitoring. Neben Verbesserungen in der Langzeitstabilität steht vor allem die Sensorfusion mit VLBI im Vordergrund, um mittelfristig Ringlaserdaten zur Verbesserung der Bestimmung der Erdorientierungsparameter nutzen zu können.

Auch der Einsatz von Transpondern für die SAR-Technologie soll am GOW erprobt werden. Damit kann zum einen für das Deformationsmonitoring die

geringe Dichte von permanenten Rückstreupunkten verbessert werden, auf der anderen Seite dienen die Transponder auch der Kalibration der Satellitenaltimeter.

Technischer Fortschritt öffnet gerade auch im Bereich der Gravimetrie die Tür zu neuen Beobachtungsverfahren, die von der FGS verfolgt und gefördert werden. Beispielsweise wurde die Entwicklung von Absolut-Quantengravimetern (AQQ) durch die Beschaffung eines Gerätes aktiv unterstützt, das jetzt in den störungsfreien Routinebetrieb überführt und durch systematische Vergleiche in das Netz klassischer Absolutgravimeter integriert werden muss. Durch Fortschritt in der Entwicklung optischer Uhren erschließen sich auch neue Möglichkeiten im Bereich der direkten Potentialmessung durch Ausnutzung von Effekten der relativistischen Geodäsie.

Objective 4. Wettzell als kohärente und konsistente Zeitbasis

Zeit und Frequenz spielen eine zentrale Rolle in allen geodätischen Raumverfahren. Alle diese Verfahren basieren auf der präzisen Messung von Signallaufzeiten. Übergeordnetes Ziel ist es, gemeinsame Uhrenparameter – neben terrestrisch gemessener Verbindungsvektoren – als neuartige lokale Verknüpfung zur Kombination der Messsysteme zu nutzen und systemspezifische Fehlerquellen zu identifizieren. Am Geodätischen Observatorium Wettzell sollen dazu alle Messsysteme kohärent mit einer einheitlichen Zeitbasis betrieben werden. Hierzu wurde eine auf kompensierten Glasfasern basierte verlustfreie Zeitverteilung aufgebaut. Über eine optisch übertragene und aktiv interferometrisch stabilisierte Zeit können sowohl intratechnisch, wie auch intertechnisch durch Close-Messungen Systematiken aufgedeckt und korrigiert werden. Herausforderung ist die verlustfreie Anbindung der einzelnen Messsysteme an die optische Zeitverteilung, eine Aufgabe, welche durch die DFG gefördert wird. Im Rahmen des Forschungsprogramms soll eine campus-weite „common clock“ für die VLBI-Teleskope realisiert werden. Geeignete Konzepte zur Einbindung von GNSS in die optische Zeit- und Frequenzverteilung sollen entwickelt und getestet werden. SLR hat von allen Techniken das größte Potential andere Zeitinseln angemessen zu verbinden, um die Kohärenz dieser „Observatory Common Clock“ auf andere geodätische Observatorien auszudehnen und mit der Zeit als neue geodätische Observable Systematiken zwischen den Fundamentalstationen zu reduzieren. Hochgenaue Zeitübertragung wie für ELT in Vorbereitung ist die bedeutendste Schlüsseltechnologie für diesen Schritt. Zeitübertragung mit passiven, diffus reflektierenden Satelliten ein unabhängiger experimenteller Erprobungsschritt.

Objective 1. Kontinuierliche Erfassung und Bereitstellung hochwertiger Messzeitreihen hoher Konsistenz

Forschungsziele	Aufgaben
1.1 Hochwertige Beiträge der Messsysteme für die internationalen geodätischen Dienste	1.1.1 Zuverlässiger Betrieb der geodätischen Messeinrichtungen (VLBI, SLR, GNSS, DORIS, Ringlaser, Absolut- und Supraleitgravimetrie)
	1.1.2 Bedarfsgerechte Anpassung der Übertragungszeiten zum Korrelator
	1.1.3 Überführung von LLR in Routinebetrieb
1.2 Systemnahe SLR-Optimierungen und Weiterentwicklungen	1.2.1 Charakterisierung der Eigenschaften der Satellitenantwortfunktion zur verbesserten Normalpunktberechnung
	1.2.2 Zusätzliche Sensorik zur Bestimmung der Dispersion der Erdatmosphäre
	1.2.3 Untersuchung polarisationsabhängiger SLR-Messungen mit AGGO zu Galileo Laserreflektoren
	1.2.4 Wettzell+AGGO: Zweifarbenmessung (auch zur Troposphären-Sondierung)
	1.2.5 Weiterentwicklung bzgl. der Systemeffizienz bei der Mondentfernungsmessung am WLRS
	1.2.6 Studie zur UT0 Bestimmung aus LLR Beobachtungen
	1.2.7 Untersuchung LLR-Fähigkeiten AGGO SLR
1.3 Automatisierter Betrieb	1.3.1 Errichtung eines gemeinsamen Betriebs der Großmesssysteme (VLBI und SLR) und Reduzierung der aktiven Kontrolle hin zur Überwachungstätigkeit
	1.3.2 Ausbau der Speicherkapazität und Glasfaser-Technik zur Daten- und Signalübertragung zwischen den VLBI-Teleskopen
	1.3.3. Ausbau der Automatisierung zum Erreichen eines komplett autonomen Beobachtungsbetriebs im Bereich VLBI, inklusive Qualitätsmanagement und Ablaufmanagement.
	1.3.4. Ideensammlung einer Qualitätsüberwachung von (VGOS) Abläufen (Scheduling bis Analyse) als Basis für ein Data Quality Coordination Centers

1.4 AGGO und O'Higgins als integrale Netzbestandteile	1.4.1	Überholung des AGGO SLR und Überführung in den Routinebetrieb
	1.4.2	Planstudie eines AGGO VGOS Teleskops
	1.4.3	Bessere Integration von O'Higgins in die Messprogramme des IVS
	1.4.4	Standardisierung/Handhabung/Wartbarkeit/ Nutzerfreundlichkeit der VLBI-Empfängerhardware in O'Higgins
	1.4.5	Machbarkeitsstudie zur Verbesserung des geodätische Empfangssystems in O'Higgins
1.5 Sicherstellung der metrologischen Rückführbarkeit grav. Messungen	1.5.1	Analyse und Dokumentation der Messprozesse in der Absolutgravimetrie einschließlich seiner Fehlerkomponenten
	1.5.2	Technologische Verbesserungen an den Absolutgravimetern zur Reduktion des systematischen und zufälligen Fehlerhaushaltes
	1.5.3	Wettzell als Vergleichs- und Referenzstation für Absolutgravimeter in Europa

Objective 2. Detaillierte Erfassung und Modellierung regionaler Prozesse und Umweltparameter

Forschungsziele	Aufgaben
2.1 Lokale geometrische Vernetzung	2.1.1 Integrierte lokale Netzausgleichung unter Nutzung terrestrischer, GNSS, SLR, VLBI Beobachtungen, einschließlich strenger Berücksichtigung von Schwerefeldgrößen (s. 8.2)
	2.1.2 Integration des Common Targets in die Messabläufe und Nutzung zur Cross-Kalibrierung der Systeme (s. 4.1.2)
	2.1.3 Permanente Vermessung der Referenzpunkte
	2.1.4 Studium der Refraktionskorrektur für terrestrische Streckenmessungen
2.2 Gravimetrie	2.2.1. Terrestrische Schwerefeldbestimmung längs X-Profil
2.3 Hydrologie	2.3.1. Kontinuierliche Erfassung hydrologischer Umweltparameter am Geodätischen Observatorium Wettzell
2.4 SAR	2.4.1 Betrieb der SAR-Reflektoren für präzise Positionierung
2.5 Messung der neutralen Atmosphäre	2.5.1 Betriebsüberführung ergänzender Sensorik, wie Radiometer, Temperaturprofiler, Lidar
	2.5.2 Beobachtungskonzept Radiosonden
	2.5.3 Erfassung von Troposphärenparametern im Lokal- und Footprintnetz
2.6 Messung von Ionosphäre und Weltraumwetter	2.6.1 Aufbau und Betrieb des Solar Flux Telescope
	2.6.2 GNSS-TEC, Betrieb eines hochraten-GNSS-Empfänger zur Messung von Szintillationen

Objective 3. Neue Technologien, Beobachtungsmethoden, Sensoren und Basisinfrastruktur

Forschungsziele	Aufgaben
3.1 VLBI-Technologien und Beobachtungen	3.1.1 Nutzung des Arrays aus drei Radioteleskopen, z.B. für Troposphärenuntersuchungen, spezielle Beobachtungskonzepte, Common-Clock-Experimente
	3.1.2 Konzept für mittelfristigen Umbau des RTW
	3.1.3 Beteiligung an Sonderbeobachtungsprogrammen und Experimenten mit Partnern in den Bereichen Ka-Band, VLBI-Transmitter auf GNSS oder auf dem Mond, etc. nach Gelegenheit
	3.1.4 Entwicklung der Sensorfusion von VLBI- und Ringlaserdaten (G und ROMY) (s. 5.5.1)
	3.1.5 Monitoring der Radioquellen-Flüsse
3.2 Koordinierte SLR-Verbundbeobachtungen	3.2.1 Demonstration/Machbarkeit am Beispiel von Wettzell SOS-W und WLRS sowie AGGO und weiterer interessierter SLR Stationen zum optimierten Scheduling des Trackings von vielen SLR Satelliten
	3.2.2 Parallelbeobachtungen mit SOS-W und WLRS zur Unterstützung von Experimenten für SLR-Doppeldifferenzen
3.3 Einsatz SAR-Technologie für die Geodäsie	3.3.1 Integration Transpondertechnik in Wettzell als Footprint-Station und für Altimeter-Kalibrierung
3.5 VLBI Korrelator Wettzell	3.5.1 Beitrag GOW insbesondere für bestimmte Prioritätsprogramme („Super-Intensive“)
3.6 Neue Technologien in der Gravimetrie	3.6.1 Betrieb des Absolute Quantum Gravimeter (AQQ)
	3.6.2 Untersuchungen zum Fehlerhaushalt des AQQ durch Vergleiche mit klassischen Messverfahren und weiteren Quantengravimetern
	3.6.3 Evaluierung neuer Technologien in der Gravimetrie (Quantentechnologie, relativistische Geodäsie)

Objective 4. Wettzell als kohärente und konsistente Zeitbasis

Forschungsziele	Aufgaben
4.1 lokale Delay-kompensierte Zeit- u. Frequenzverteilung	4.1.1 Überführung der optischen Zeit- und Frequenzverteilung in den Dauerbetrieb (Campusweite Common Clock)
	4.1.2 Integration des Zeit- und Frequenzreferenzierten Zentraltargets in die Messabläufe bei SLR und VLBI zur Reduktion systematischer Fehler durch Schleifenschluß (s.2.1.2 und 5.2.2)
4.2 SLR	4.2.1 Untersuchung der Nutzung der optisch realisierter Zeitmarken für rein optische Zeitintervallmessungen zur Vermeidung systematischer Fehler
	4.2.2 Exakte optische Zeitübertragung vom Boden zum Satelliten und vom Boden zum Boden (ELT)
	4.2.3 Hochgenaue Zeitübertragung zwischen Observatorien durch diffuse passive Satellitenreflektoren
4.3 VLBI	4.3.1 Nutzung des optisch realisierten PCAL-Systems
	4.3.2 Einführung der optischen Delay-Kompensation zwischen Teleskop und DBBC.
	4.3.3 Realisierung einer campusweiten Common Clock für VLBI und Nutzung der kompensierten, optischen Zeitverteilung für alle Komponenten in der VLBI-Aufzeichnungskette.
4.4 GNSS	4.4.1 Entwicklung / Erprobung von geeigneten Konzepten für die Einbindung von GNSS Empfänger in die optische Zeit- und Frequenz- Verteilung
	4.4.2 Untersuchung des Potentials einer Common Clock bei GNSS
4.5 Realisierung von Zeitskalen	4.5.1. Kontinuierlicher Beitrag des Geodätischen Observatoriums Wettzell zur internationalen Atomzeit
	4.5.2 Steuerung der Wettzeller Zeitskala an UTC heran
	4.5.3 Konzeptentwicklung für Composite Clock.
	4.5.4 Untersuchung zur Nutzung der Anbindung an das europaweite Frequenzvergleichsnetz als Voraussetzung zur Synchronisation der Zeit zwischen geodätischen Observatorien Schleifenschluß über die Zeit

2.2 Methodik, Analyse, Modellbildung

Mit ihren Forschungsvorhaben will die FGS zur Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der geometrischen und gravimetrischen Einzelverfahren maßgeblich beitragen und die Nutzbarkeit ihrer Ergebnisse sicherstellen. Ausgangspunkt für die Definition dieser Ziele sind die Vorgaben des GGOS, zu denen die FGS mit Ihren Arbeiten fundamental beiträgt. Unabdingbar dafür ist, dass die Produkte der geodätischen Beobachtungsverfahren und dabei insbesondere die Referenzsysteme eine langfristige Stabilität aufweisen. Gleichzeitig ist es das erklärte Ziel, die Genauigkeit der Einzelverfahren weiter zu steigern. Ein signifikanter Anteil der Arbeiten soll auf die Weiterentwicklung der Modellbildung und Standardisierung abzielen, wobei der konsistente integrierte Raumbezug durch die Kombination geometrischer und gravimetrischer Verfahren und Analysemethoden sowie durch die Einbindung physikalischer Höhen in die geometrischen Referenzsysteme im Vordergrund steht. Die FGS-Institutionen übernehmen bei allen Beobachtungstechniken eine Vielzahl von Verpflichtungen im Rahmen internationaler Dienste und erreichen dadurch eine beachtliche internationale Sichtbarkeit. Den Beitrag zu den wissenschaftlichen Diensten und die Mitarbeit an zentralen Stellen zur Gestaltung der internationalen wissenschaftlichen Programme sieht die FGS als eine strategische Langzeitaufgabe (siehe Schwerpunkt 3).

In den folgenden Abschnitten ist für jedes einzelne definierte Objective des Forschungsschwerpunkts „Methodik, Analyse, Modellbildung“ der jeweilige Mehrwert der FGS gegenüber den Beiträgen einzelner Institutionen hervorgehoben. Nach dieser generellen Darstellung sind die jeweiligen Forschungsziele detailliert beschrieben und in den Kontext des zukünftigen FGS-Forschungsprogramms eingeordnet.

Objective 5: Verbesserung des Raumbezugs durch Integration und Kombination geometrischer Beobachtungsverfahren

Die konsistente Verknüpfung geometrischer Beobachtungsverfahren wird innerhalb der FGS angestrebt durch die Weiterentwicklung der Kombinationsmethodik sowie der Nutzung des gesamten Potentials der Ko-Lokation der Messverfahren am Boden und insbesondere im Weltraum. Neben dem terrestrischen Referenzrahmen spielen dabei die Satellitenbahnen eine zentrale Rolle, da sie das verbindende Element zwischen allen geodätischen Zielparametern (geometrisch und gravimetrisch) darstellen. Innerhalb der FGS sollen neue Beobachtungstypen der Satellitenverfahren und des VGOS-Beobachtungsprogramms ausgewertet werden, um eine noch stärkere Verknüpfung der Verfahren zu erreichen. Im Rahmen einer angestrebten DFG Forschergruppe zur Uhrenmetrologie sollen weitere Möglichkeiten zur Verknüpfung der Messverfahren untersucht werden. Die FGS verfügt bei allen Beobachtungstechniken über eine ausgezeichnete Expertise und kann institutsübergreifend insbesondere die konsistente Verknüpfung dieser Beobachtungsverfahren voranbringen.

Objective 6: Weiterentwicklung der Modellierung des statischen und zeitvariablen Schwerefelds

Hochgenaue Informationen über das Schwerefeld spielt für die Bestimmung der physikalischen Höhe als Vertikalkomponente des integrierten Raumbezugs eine zentrale Rolle. Die Modellierung des statischen und zeitvariablen Schwerefeldes basiert auf der Analyse von Satelliten-Beobachtungszeitreihen. Zur Erhöhung der räumlichen Auflösung werden Satellitenmodelle mit zusätzliche Daten aus terrestrischer Schweremessung und Beobachtungen der Satellitenaltimetrie kombiniert. Die Methodik, Stochastik und Numerik zur Berechnung zeitlich und räumlich hoch aufgelöster globaler und regionaler Schwerefelder spielt dabei eine zentrale Rolle und soll innerhalb der FGS weiterentwickelt werden. Der Mehrwert der FGS spiegelt sich in diesem Objective durch die Expertise im Bereich der Schwerefeldmodellierung, der Satellitenaltimetrie und der Kombinationsmethodik wieder. Zudem verfügt die FGS über eine weitreichende Expertise im Bereich der Schwerefeld-Validierung.

Objective 7: Konsistente Realisierung des integrierten Raumbezugs

Die Realisierung des integrierten Raumbezugs für die Höhenkomponente, die konsistente Schätzung von terrestrischem Referenzrahmen (TRF), zälestischem Referenzrahmen (CRF) und den Erdorientierungsparametern (EOP) sowie die Kombination von Geometrie und Schwere stellen drei der aktuellsten Forschungsfragen innerhalb der physikalischen und Satelliten-Geodäsie dar. Die Institute der FGS zeichnen sich hier durch die maßgebliche Entwicklung zukünftiger Realisierungs- und Kombinationsstrategien aus und profitieren signifikant vom Informationsaustausch innerhalb der FGS. Mehrere Projekte in diesem Forschungsbereich der FGS belegen die enge Verknüpfung der Mitgliedsinstitutionen und ihren Stellenwert im internationalen Kontext. Als Beispiel seien die Beiträge zum internationalen Höhenreferenzsystem (IHRs) genannt. Des Weiteren sollen am Observatorium Wettzell Schweremessungen in das lokale Vermessungsnetz integriert werden (gravimetrisches Footprint-Netz) und deren zusätzliche Information innerhalb der FGS überprüft werden. Schließlich spielen hochgenaue Orbits eine maßgebliche Rolle bei allen satellitenbasierten Verfahren zur Realisierung des Raumbezugs.

Objective 8: Lokales Monitoring von geodätischen Observatorien

An der Fundamentalstation Wettzell soll das Sensornetzwerk weiter aus-ge-weit werden und um zusätzliche Sensoren ergänzt werden. Die Messrei-hen dienen der Unterstützung der Beobachtung von lokalen Deformationen und atmosphärischen Parametern, die insbesondere bei der Analyse geodä-tischer Weltraumbeobachtungen und deren Kombination durch Ko-Lokation eine fundamentale Rolle spielen. Darüber hinaus setzt das in Wettzell ent-wickelte einheitlich realisierte Zeitsystem eine völlig neue Herangehensweise an die Auswertung geodätischer Beobachtungen voraus, die nur innerhalb der FGS für alle Verfahren und Parameter entwickelt werden kann. Die FGS verfügt in diesem Bereich über die Expertise von der verbesserten Datenge-winnung durch optimierte Korrekturmodelle bis hin zur physikalisch-gestütz-ten Auswertung, was einen deutlichen Mehrwert bei der Analyse technik-spezifischer Systematiken darstellt.

Objective 9: Monitoring und Erforschung von Komponenten des Erdsystems

Das komplexe System Erde lässt sich in verschiedene Subsysteme wie z.B. die feste Erde, die Ozeane, die Atmosphäre, die Hydrologie und die Kryo-sphäre aufspalten. Jedes einzelne Subsystem beeinflusst die jeweils ande-ren Subsysteme, so dass eine getrennte Beobachtung, Modellierung und In-terpretation von Ergebnissen heutzutage nicht mehr dem Stand der For-schung entspricht. Die FGS mit ihren jeweiligen Institutionen zeichnet sich hier im Vergleich zu anderen Forschungsinstitutionen dahingehend aus, dass innerhalb der FGS an allen Subsystemen eine fundierte Expertise vor-liegt und somit eine Subsystem-übergreifende Analyse und Interpretation der Ergebnisse möglich ist. Im Fokus stehen sowohl die Wechselwirkungen zwis-chen den einzelnen Subsystemen als auch der Einfluss der Sonne auf den Atmosphärenzustand. Hierunter fallen sowohl das Monitoring des Weltraum-wetters sowie dessen Wirkung auf Positionierung und präzise Satelliten-bahnbestimmung unter Berücksichtigung atmosphärischer Kopplungsme-chanismen.

Objective 10: Simulation von geodätischen Beobachtungssystemen

Simulationen von geodätischen (geometrischen und gravimetrischen) Be-obachtungssystemen eignen sich dazu, bestehende technik-spezifische Sys-tematiken zu untersuchen, zukünftige Potentiale der Beobachtungs-techni-ken aufzudecken, neuartige Beobachtungsmissionen zu planen und die ge-odätische Infrastruktur zu verbessern. Innerhalb der FGS sollen unter die-sem Objective die bereits vorhandenen Simulationsstudien im Bereich neuer Schwerefeldmissionen, neuer Ko-Lokationen am Boden und im Weltraum sowie optimierter Beobachtungsszenarien ausgeweitet und zusammenge-führt werden. Hierbei liegt der Fokus auf der Entwicklung neuartiger Satelli-tenmissionen, die insbesondere die Kombination von Schwere und Raum-bezug voranbringen.

Objective 5: Verbesserung des Raumbezugs durch Integration und Kombination geometrischer Beobachtungsverfahren

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
5.1 Analyse neuer Beobachtungstypen der Satellitenverfahren	5.1.1 Multi-GNSS: Analyse langer Multi-GNSS-Beobachtungszeitreihen; Untersuchung systemspezifischer Biases; Verbesserung der GNSS Bahnmodellierung; Einfluss auf globale geodätische Parameter (ITRF, ERP, Schwerefeld)	SGD
	5.1.2 DORIS: Aufbau und Nutzung der DORIS-Datenanalyse; Verwendung der JASON-3 Near-Real-Time DORIS Daten, z.B. zur Ionosphärenmodellierung, Analyse der Verarbeitung von Phasenmessungen	DGFI SGD
	5.1.3 Intersatellite-Links (ISL): Methodenentwicklung und Erforschung von ISL zur Bahnbestimmung von GNSS, GEO, und LEOs; Analyse des Potentials für Schwerefeldbestimmung und ITRF	SGD
	5.1.4 SAR: Nutzung des geplanten Transponders am GOW für die Altimeterkalibrierung (s. 3.3)	DGFI
	5.1.5 Wide-swath und fully-focused SAR Altimetrie: Entwicklung von Analysemethoden zur Auswertung der Messungen von Sentinel-6 und SWOT für Anwendungen in Hydrologie und Ozeanforschung	DGFI
5.2 Nutzung des vollständigen Potenzials der Ko-Lokationen am Boden	5.2.1 Local ties: Untersuchung der Kombinationsmethodik (u. A. Gewichtung, zeitliche Auflösung, Berücksichtigung der Messepochen); Einheitliches geometrisches Referenzziel (mit 4.1.2)	DGFI BKG
	5.2.2 Zeit: Analyse des Verbesserungspotentials eines einheitlichen Zeitsystems auf geodätische Raumbeobachtungen (mit 4.1-4.4)	FESG DGFI
	5.2.3 Troposphäre: Kombination von Troposphärenparametern unterschiedlicher geodätischer Raumverfahren; Analyse des Einflusses auf geodätische Parameter	BKG
	5.2.4 Triple-VLBI-Auswertung: Auswertung und Analyse ultra-kurzer Basislinien; lokale Korrelation (s 3.1.1)	BKG DGFI
	5.2.5 Double-SLR-Auswertung: Zusatznutzen durch Anzielen des gleichen Ziels; Verwendung unterschiedlicher Wellenlängen, Scheduling (s. 3.2.2)	DGFI BKG

5.3 Nutzung der Ko-Lokationen im Weltraum	5.3.1 Kombination der Satellitenverfahren (GNSS, SLR, DORIS): Kombinierte Analyse aller Satellitenbeobachtungsverfahren auf einer Plattform; Untersuchung inter-technischer Systematiken; Einfluss auf Satellitenorbit und alle geodätischen Produkte	BKG DGFI SGD
	5.3.2 VLBI zu Satelliten: Grundlagenforschung, Methodenentwicklung, Potentialuntersuchung für Kombination	SGD
5.4 Handhabung geophysikalischer Einflüsse in der Datenanalyse zur Modellierung nicht-linearer Stationsbewegungen	5.4.1 Korrektur nicht-gezeitenbedingter Auflastdeformationen mittels geophysikalischer Modelle in der Datenanalyse und TRF-Berechnung	BKG DGFI
	5.4.2 Nutzung der erfassten atmosphärischen Informationen in der Datenanalyse	FESG
5.5 Kombination der Ringlaserdaten mit VLBI- und GNSS-Daten	5.5.1 Potentialuntersuchung; Methodenentwicklung; Nutzung zur hochaufgelösten ERP-Bestimmung (s. 3.1.4)	FESG
5.6 Methodenentwicklung zur TRF- und EOP-Berechnung	5.6.1 Parametrisierung: Mathematische Darstellung TRF (systematische Effekte), EOP	DGFI BKG
	5.6.3 Datumsfestlegung: Festlegungsstrategien; Stationsauswahl; Bedingungsarten; Inkonsistenzen;	DGFI BKG
	5.6.4 Zeitlich hoch aufgelöste TRFs (Epochen-RFs): zeitlich hoch aufgelöste TRF-Berechnung (z.B. mittels Kalman-Filter); neue Strategien zur EOP-Berechnung	DGFI BKG

Objective 6: Weiterentwicklung der Modellierung des statischen und zeitvariablen Schwerefelds

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
6.1 Analyse von Satelliten-Beobachtungszeitreihen	6.1.1 GRACE, GRACE-FO: Bündige Verknüpfung der Missionen; Vergleiche KBR/LRI und Impact auf Güte von Schwerefeldmodellen; Analyse und Verbesserung der Akzelerometer-Zeitreihen	APG
6.2 Weiterentwicklung von Methodik, Stochastik und Numerik zur zeitlich und räumlich hochauflösenden globalen und regionalen Schwerefeldanalyse	6.2.1 Bestimmung von stochastischen Modellen für terrestrische und Satellitenbeobachtungen	APG
	6.2.2 Hochauflösende Modellierung: Entwicklung von Methoden zur Kombination, globale sphärisch-harmonische Modelle mit sehr hoher Auflösung, Nutzung von numerisch intensivem Rechnen	APG
	6.2.3 Weiterentwicklung von regionalen Methoden zur Geoidmodellierung und von Verfahren der Daten- und Modellkombination: Methodenvergleich, verbesserte stochastische Modellierung	APG DGFI
6.3 Hochauflösende regionale Geoidmodellierung	6.3.1 Absolute Potentialwerte: Methodik zur Bestimmung von absoluten Potentialwerten an IHRF-Referenzstationen (mit 7.2)	APG DGFI
	6.3.2 Geoidmodellierung unter Berücksichtigung spezieller Datensituationen: Geoidbestimmung bei schlechter Datenlage oder rauer Topografie	APG DGFI
	6.3.3 Überregionale Geoidbestimmung: Konsistenz von Datensätzen, DACH-Geoid	BKG APG
6.4 Globale kombinierte Schwerefeldmodelle	6.4.1 Kombination: Relative optimale Gewichtung von terrestrischen und Satellitendaten	APG
	6.4.2 Marines Schwerefeld: Ableitung von altimetrischen Schwereanomalien	APG
	6.4.3 SLR: Beiträge von SLR zur Bestimmung der niedrigen harmonischen Koeffizienten (statisch, zeitvariabel); optimale Kombination	DGFI
6.5 Schwerefeld-Validierung	6.5.1 Punktweise Vergleiche mit Geoid, Schwere, Lotabweichungen: Minimierung des Einflusses hochfrequenter Schwerefeldsignale (omission error),	APG
	6.5.2 Nutzung konsistenter nationaler europäischer und internationaler GNSS/Nivellementdatensätze	APG
	6.5.3 Nutzung von Modellen der mittleren dynamischen Ozeantopografie zur Schwerefeldvalidierung	APG

Objective 7: Konsistente Realisierung des integrierten Raumbezugs

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
7.1 Kombinierte Analyse zur Bestimmung konsistenter CRF + TRF + EOP	7.1.1 Gemeinsame Bestimmung von TRF, EOP, CRF; VLBI-only; Inter-technisch; Gewichtung; Systematiken; Effekte auf geodätische Parameter	DGFI BKG
	7.1.2 Multifrequenz CRF: Methodenentwicklung in der VLBI-Auswertung (z.B. Berücksichtigung von Quellenstrukturen); Effekte auf CRF	BKG DGFI
	7.1.3 Nutzung delay rate: Methodenentwicklung in der VLBI-Auswertung; Potenzialanalyse; Effekte auf geodätische Parameter	SGD
7.2 Höhenbezug	7.2.1 Einbindung von Höhenreferenzpunkte in den TRF: globale Auswahl der Referenzpunkte; Definition der Referenzpunkte; Verknüpfung mit Geometrie-Referenzpunkten;	DGFI
	7.2.2 Potenzialdifferenzen zwischen Höhenreferenzpunkten: Potenzialbestimmung für beliebige Koordinaten;	DGFI APG
	7.2.3 Beiträge zum IHRS: Gezeitemsysteme, Zeitvariationen, ...	DGFI APG
7.3 Kombination Geometrie und Gravimetrie	7.3.1 Kombinierte Analyse der GNSS-, SLR- und VLBI-Daten und Verknüpfung zum globalen Schwerefeld: Schätzung von Schwerefeldparametern in geometrischen Techniken; Parameterkorrelationen; Physikalische Datumsfestlegung;	BKG DGFI
	7.3.2 Konsistente Kombination von geometrischen und physikalischen Höhen bzw. dem Geoid (GNSS-Levelling):	APG DGFI BKG
	7.3.3 Beiträge zum Internationalen Schwerereferenzsystem: Wettzell und AGGO als Referenzstationen des Internationalen Schwerereferenzrahmens (IGRF) und des Internationalen Höhenreferenzrahmens (IHRF)	BKG
7.4 Hochgenaue Orbits	7.4.1 Modellierung von nicht-gravitativen Effekten zeitvariablen Effekten, anderen Bahnstörungen; Oberflächeneigenschaften von Satelliten;	DGFI SGD
	7.4.2 Kombinierte Bahnbestimmung (s. 5.3)	BKG DGFI

Objective 8: Lokales Monitoring von geodätischen Observatorien

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
8.1 Gravimetrisches Footprint-Netz	8.1.1 Kontinuierlicher Betrieb des Footprint-Netzes, Auswertung, Identifikation systematischer Effekte, Interpretation (s. 2.1.)	GOW
8.2 Verbesserte Lokalnetz-Auswertung	8.2.1 Einheitliches geometrisches Referenzziel in Wettzell: Quantifizierung inter-technischer Systematiken; Regelmäßige Auswertung; Kalibration (s. 4.)	FESG
	8.2.2 Verwendung von Schwerefeldinformation für Berechnung von local ties: Bestimmung und Berücksichtigung von Lotabweichungen bei der local tie Berechnung (s. 2.1.)	GOW
8.3 Optimierung der lokalen Korrekturmodelle	8.3.1 Hydrologische Korrekturzeitreihen für den Gravimeterstandort Wettzell: Zeitreihen des hydrologischen Sensornetzes der Station Wettzell einschließlich Ableitung eines hydrologischen Modells in Kooperation mit dem GFZ Potsdam (s.2.3.)	GOW GFZ
	8.3.2 Korrekturmodelle: kontinentale Hydrologie, Ozeanauflasten und atmosphärische Auflasten für AGGO in Kooperation mit der Universität La Plata und dem GFZ Potsdam	GOW GFZ ULP
	8.3.3 Untersuchung der Multipath-Umgebung und von Beugungseffekten an den GNSS Antennenstandorten	IGG
8.4 Integrale Modellierung geometrischer und gravimetrischer Veränderungsprozesse	8.4.1 Modellierung, Validierung und Interpretation von präzisen Schwerezeitreihen an gravimetrischen Referenzstationen, Interpretation der Ergebnisse im Kontext des Globalen Wandels	BKG
	8.4.2 Konsistente Analyse und Interpretation von Zeitreihen aus GNSS und terrestrischer Gravimetrie im GREF-Netz	BKG

Objective 9: Monitoring und Erforschung von Komponenten des Erdsystems

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
9.1 Ozean	9.1.1 Verbesserte Auswertelgorithmen für Altimeterbeobachtungen aus unterschiedlichen Sensoren (z.B. Retracking, geophysikalische Korrekturen) für die Ermittlung hochgenauer Informationen über Meeresspiegelvariationen und Wellenhöhen	DGFI
	9.1.2 Weiterentwicklung der konsistenten Kombination aller verfügbaren Altimetermissionen zur Optimierung der räumlichen und zeitlichen Auflösung von Meeresspiegelmessungen (Altimeterkalibration, Multi-Missions Altimetrie)	DGFI
	9.1.3 Entwicklung von neuen/verbesserten Methoden zur hochgenauen und hochaufgelösten Ableitung von Meeresspiegel, Ozeangezeiten, Dynamischer Ozeantopographie und Oberflächenströmungen aus Satellitenaltimeterdaten (einschließlich räumlicher Interpolation)	DGFI
9.2 Atmosphäre	9.2.1 Integration solarer Information, d.h. Sonnenbeobachtungen, in geodätische Schätzverfahren; Berücksichtigung von Kopplungsmechanismen zwischen Atmosphärensubsystemen, z.B. Iono- und Thermosphäre; Entwicklung von Vorhersagemodelle zur Berücksichtigung von Weltraumwetterinformationen: Unterstützung des Aufbaus eines nationalen Weltraumweterservice (s. 2.6.).	DGFI
	9.2.2 Entwicklung von Elektronendichtemodellen zur Verbesserung der Positionierung, Wasserstandsbestimmung und zur möglichen Detektion von Weltraumwettereinflüssen und Naturkatastrophen; Beiträge zur Bereitstellung globaler VTEC-Karten des IGS; Entwicklung von Vorhersagemodellen Berücksichtigung der Magnetosphäre zur Detektion von geomagnetischen Stürmen und Sub-Stürmen.	DGFI
	9.2.3 Verbesserung empirischer und physikalischer Thermosphärenmodellen durch Thermosphärendichtebeobachtungen aus SLR-, DORIS-, GPS-Messungen und TLE-Daten in Bezug auf LEO-Satelliten; Beiträge zur Detektion des Klimawandels aus Thermosphärendichtebeobachtungen.	DGFI

9.3 Kontinentale Hydrologie	9.3.1	Verbesserung der Methodik zur Bestimmung von Wasserständen aus Altimeterbeobachtungen (Retracking-Algorithmen, Waveform-Klassifikation, Genauigkeitsabschätzung,...); Ableitung von Speicheränderungen und Abfluss	DGFI
	9.3.2	Schwerefeldmodell-Postprozessierung	APG
	9.3.3	Vergleiche von terrestrischen Schwerevariationen mit Satellitenschwerefeldmodellen	APG
9.4 Kryosphäre	9.4.1	Eismassenbilanzen	APG
9.5 Feste Erde	9.5.1	Lithosphäre: Moho-Tiefe	APG
	9.5.2	Bestimmung der Plattenkinematik und Geodynamik (z.B. Deformationsmodelle, vertikale Landbewegung) aus der Kombination unterschiedlicher Beobachtungsverfahren, Zeitreihenanalyse	DGFI

Objective 10: Simulation von geodätischen Beobachtungssystemen

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
10.1 Entwicklung und Simulationen von Konzepten für neue Satelliten-schwerefeldmissionen	10.1.1 Multi in-line Satellitenpaare: Untersuchung von optimalen Bahnparametern von Multipaar-Missionen, Mitigation von zeitlichen Aliasing-Effekten	APG
	10.1.2 Entwicklung neuartiger Beobachtungskonzepte: Intersatelliten-Distanzbeobachtung zwischen hoch- und niedrigfliegenden Satelliten	APG
	10.1.3 Einfluss von Instrumentengenauigkeiten auf Schwerefeld-Performance: Analyse von Instrumentenanforderungen von Satellitensensoren unter Einbeziehung von neuartiger Quantensensorik.	APG
	10.1.4 Nutzung von Kleinstsatelliten (Pico-Satelliten) zur Schwerefeldbestimmung: Konstellationsdesign, erzielbare räumliche und zeitliche Auflösung, erforderliche Genauigkeiten	APG
	10.1.5 Numerische End-to-end Simulationen von Missionskonzepten	APG
	10.1.6 Methodenentwicklung zur optimalen Raum-Zeit-Parametrisierung zeitvariabler Schwerefeldmodelle für zukünftige Missionskonzepte	APG
10.2 Simulation von Beobachtungsnetzen	10.2.1 Simulation von Szenarien für die Verteilung und Effizienz von Beobachtungsstationen für verschiedene Techniken	DGFI
	10.2.2 Simulation von Satellitenkonfigurationen	DGFI
10.3 Optimierung der Beobachtungsszenarien	10.3.1 SLR Scheduling (s. 3.2)	GOW
10.4 Integrale Simulation von Satelliten-Beobachtungssystemen	10.4.1 Entwicklung eines Konzepts für einen übergeordneten Simulator für unterschiedliche geometrische und gravimetrische Beobachtungstechniken und Satellitenmissionen	alle

2.3 Produkte, Anwendungen, Internationale Zusammenarbeit

Eine wesentliche Zielsetzung der Forschungsarbeiten der FGS ist die Ermittlung von Strategien zur Erzeugung bestmöglicher geodätischer Datensätze, die als Produkte für Nutzer aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen und für die praktische Anwendung zur Verfügung gestellt werden können. Unter *bestmöglich* verstehen wir in diesem Kontext Daten von höchster erreichbarer Genauigkeit und Konsistenz, die nach internationalen Standards und Konventionen erzeugt werden.

Die FGS analysiert und kombiniert Beobachtungsdaten aller relevanten geodätischen Weltraumbeobachtungsverfahren auf dem neuesten Stand der Forschung. Dabei entstehen hochwertige Zeitreihen klassischer geodätischer Parameter, die die Geometrie der Erdoberfläche, die Erdrotation und das Schwerfeld teilweise über mehrere Jahrzehnte hinweg beschreiben. Aus den geodätischen Beobachtungsdaten und unter Einbeziehung weiterer komplementärer Datenquellen leitet die FGS, zumeist in interdisziplinärer Kooperation, auch eine Vielzahl von Parametern ab, die dynamische Prozesse in unterschiedlichen Komponenten des Erdsystems abbilden und dadurch wichtige Beiträge zur Erforschung des Systems Erde darstellen.

Zu den Zielen der FGS gehört auch die Überführung von Forschungsergebnissen in operationelle Systeme, um Zeitreihen von Parametern kontinuierlich und automatisiert verfügbar zu machen. Dazu muss die gesamte Prozessierungskette von der Datenakquisition über die Datenanalyse und Kombination bis hin zur Berechnung und Bereitstellung der Produkte für verschiedene Zeithorizonte (z.B. finale Produkte, (N)RT-Produkte, Prädiktionen) automatisiert werden.

Die FGS ist bestrebt, die Verwendung der entstehenden Datensätze in weiterführenden Studien, sowohl in der Geodäsie als auch in unterschiedlichen Disziplinen der Erdsystemwissenschaften, zu fördern. Zu diesem Zweck sind die Daten einschließlich Genauigkeitsinformationen nutzerfreundlich aufzubereiten und dem internationalen Nutzerkreis über geeignete Portale (z.B. Pangaea) zugänglich zu machen. Auch sollen die Arbeiten und Ergebnisse einem möglichst weitem Kreis an Nutzern sowie der interessierten Öffentlichkeit besser bekannt gemacht werden. Eine Erweiterung der interdisziplinären Zusammenarbeit über gemeinsame Projekte mit Wissenschaftlern aus anderen Disziplinen der Geowissenschaften sollen die Nutzung der Daten für die Erforschung des Systems Erde intensivieren.

Seit vielen Jahrzehnten ist die FGS über die Beteiligung an zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten weltweit vernetzt, und sie kooperiert an zentralen Positionen in internationalen wissenschaftlichen Organisationen. Insbesondere verpflichtet sich die FGS zu einem nachdrücklichen Engagement in der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) und deren internationalen wissenschaftlichen Diensten (IAG Scientific Services), die das Rückgrat der internationalen geodätischen Dateninfrastruktur bilden. In diesem Kontext betreibt die FGS Daten- und Analysezentren, und sie strebt nach Schlüsselpositionen und Leitungsfunktionen in Gremien, Projekten, Arbeits- und Studiengruppen der IAG und anderer internationaler Organisationen, um die künftige wissenschaftliche Entwicklung der Geodäsie verantwortlich mitzugestalten.

Auch im Globalen Geodätischen Beobachtungssystem (GGOS) der IAG hat die FGS seit vielen Jahren eine zentrale Stellung inne. Ein erklärtes Ziel der FGS ist es, auch künftig in GGOS-Führungspositionen mitzuwirken und dieses wichtige internationale Projekt durch starkes Engagement zum Erfolg zu führen.

Objective 11: Aufbereitung und Ableitung hochwertiger geodätischer Produkte

Hochwertige geodätische Produkte sind ein wesentliches Ergebnis der Forschungsarbeiten der FGS. Hierbei besteht eine enge Verknüpfung mit der verfügbaren Beobachtungsinfrastruktur am Geodätischen Observatorium Wettzell (siehe 2.1) und den Forschungsarbeiten im Bereich „Methodik, Analyse, Modellbildung“ (siehe 2.2). Der Mehrwert der FGS ist dadurch gegeben, dass die beteiligten Institutionen das gesamte Spektrum der geometrischen und gravimetrischen Beobachtungsverfahren bearbeiten, was eine wichtige Voraussetzung für die Ableitung hochpräziser geodätischer Produkte darstellt. Das Spektrum der Produkte umfasst Realisierungen des terrestrischen und raumfesten Referenzsystems, Erdorientierungsparameter, statische und zeitvariable Schwerefelder, präzise Orbits für geodätische und Fernerkundungssatelliten, Koordinatenzeitreihen und Deformationsfelder der festen Erde sowie Parameter der Erdsystemkomponenten Atmosphäre, Ozean, Hydrosphäre und Kryosphäre.

Die FGS strebt an, in Zusammenarbeit mit dem Schwerpunktbereich 2.2 die Analyse und Kombinationsverfahren zu verfeinern, um die Qualität, Konsistenz und Langzeitstabilität bereits verfügbarer Produkte (z.B. ITRF, ICRF, EOP, Bahnen, statisches und zeitvariables Schwerefeld, Meeresspiegeländerungen, Eismassenvariationen, VTEC-Modelle) sowie deren räumliche und zeitliche Auflösung weiter zu verbessern. Ein wichtiges Ziel ist auch, neuartige Produkte zu entwickeln (z.B. Wellenhöhen, Ozeanströmungen mit höherer räumlicher Auflösung, Elektronendichtemodelle) und gegebenenfalls in operationelle Systeme zu überführen (siehe Objective 12). Mit diesen Arbeiten liefert die FGS wichtige Beiträge für die internationalen wissenschaftlichen Organisationen (siehe Objective 15), für die Erdsystemforschung und für ein weitgefächertes Anwendungsspektrum. Für politische Entscheidungsträger lassen sich aus den Produkten belastbare Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels ableiten, was die gesellschaftliche Relevanz und Sichtbarkeit der FGS-Beiträge erheblich verbessert. Insgesamt ergänzen sich die einzelnen Beiträge der FGS-Institutionen, so dass durch eine Kombination der Einzelbeiträge eine wichtige Voraussetzung für die Ableitung konsistenter und integrierter Produkte gegeben ist.

Objective 12: Überführung von FE-Ergebnissen in operationelle Systeme

Um die im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms der FGS erzeugten geodätischen Produkte Nutzern routinemäßig zur Verfügung stellen zu können, sind operationelle Systeme zu entwickeln. Diese bereiten die Ergebnisse selbstständig, d.h. automatisch mittels effizienter Methoden und Algorithmen auf. Neben den traditionellen Verfahren wie beispielsweise der Kalman-Filterung zählen hierzu heutzutage auch Verfahren, die unter den Begriffen „Machine Learning“ (ML) oder Künstliche Intelligenz (KI, in engl.: Artificial Intelligence (AI)) bekannt sind. Operationelle Systeme stellen dem Nutzer Informationen bzw. Daten regelmäßig mit einer bestimmten Latenzzeit zur Verfügung. Im Fall von Echtzeitanwendungen, wie beispielsweise dem autonomen Fahren, darf die Latenzzeit einen vorzugebenen Wert nicht überschreiten. Innerhalb der Software-Entwicklung OPTIMAP, die u.a. Ionosphärenparameter in Echtzeit liefern und Weltraumwetterbeobachtungen beinhalten wird, kann die Latenzzeit beispielsweise mit 1 Minute festgelegt werden. Für die kommende Periode ist die (Weiter-)Entwicklung von operationellen Systemen insbesondere für Erdrotationsparameter sowie für Zustandsgrößen der Atmosphäre und von Binnengewässern vorgesehen. Ebenfalls wird die Nutzung von Nahe-Echtzeit-Schwerefeldlösungen, abgeleitet aus aktuellen und zukünftigen Schwerefeldmissionen, für operationelle Services im Bereich des Monitorings und der Vorhersage von Dürren und

Fluten evaluiert und es werden Algorithmen entwickelt, die solche Modelle mit kurzer Latenzzeit bereitstellen können.

Objective 13: Outreach

Die FGS stellt mit dem Betrieb des Geodätischen Observatoriums und den Forschungsarbeiten der beteiligten Institutionen relevante Messdaten und Produkte für die Wissenschaft und die Gesellschaft zur Verfügung. Eine wichtige Zielsetzung ist, die Methoden für eine nachhaltige Datenhaltung und Bereitstellung der Messdaten sowie der geodätischen Produkte nach dem neuesten Stand der Technik weiterzuentwickeln und eine Qualitätssicherung der Ergebnisse zu gewährleisten. Diese Arbeiten betreffen verschiedene Datenportale, die von der FGS betrieben werden wie das IERS Daten- und Informationssystem, diverse Datenzentren für SLR-, VLBI- und GNSS-Daten, AGrav als internationale Datenbank für Absolutschweremessungen sowie Webportale für Altimetrie-Daten und abgeleitete Ergebnisse. Ein weiteres Ziel besteht darin, die Sichtbarkeit und den nutzerfreundlichen Zugriff auf die Datenprodukte durch die Erstellung von Metadaten und die Anwendung von Digital Object Identifier (DOI) weiter zu verbessern. Hierzu beteiligt sich die FGS mit ihren Arbeiten in den IAG-Diensten und GGOS.

Weiterhin soll durch innerhalb der FGS abgestimmte populärwissenschaftliche Vorträge und Medienpräsenz die Öffentlichkeitsarbeit intensiviert werden, um die Relevanz der Forschungsarbeiten und die Ergebnisse der FGS besser zu bewerben und sichtbarer zu machen. Es ist auch vorgesehen, die Zusammenarbeit mit Entscheidungsträgern zu intensivieren, um gesellschaftlich besonders relevante Ergebnisse wie die FGS-Beiträge zum Thema Weltraumwetter stärker in den Fokus zu rücken.

Objective 14: Ausbau der Kooperation im geowissenschaftlichen Umfeld

Um ihre Forschungsarbeiten und die erzielten Ergebnisse einem möglichst breiten Kreis an Nutzern bekannt zu machen, beteiligt sich die FGS an nationalen und internationalen Fachveranstaltungen und interdisziplinären Foren, und sie ergreift gezielte Werbemaßnahmen. Sie strebt aktiv die Erweiterung der interdisziplinären Zusammenarbeit an und initiiert fachübergreifende Projekte. Die enge Verzahnung mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen sowohl auf den Gebieten der Geowissenschaften und Erdsystemforschung, als auch auf den Gebieten der Naturwissenschaften und Informatik (z.B. Big Data, KI) ist für die FGS von hoher Relevanz. Als Beispiel kann das DFG-Graduiertenkolleg UPLIF genannt werden, welches zusammen mit Geophysik und Geologie der LMU installiert wurde. Durch den fachübergreifenden Dialog entstehen Rückkopplungen auf die eigenen Forschungsarbeiten, wovon die FGS sich eine Steigerung der Qualität und Effizienz verspricht. In Zusammenarbeit mit geowissenschaftlichen Disziplinen sollen die geodätischen Beobachtungsergebnisse in Hinblick auf Erdsystemprozesse und Signaturen von Umweltveränderungen und des Klimawandels hin analysiert werden. Außerdem sollen die Daten der FGS stärker als bisher genutzt werden, um physikalische Modelle zu verbessern und auf diese Weise einen direkten Mehrwert für die Erdsystemforschung zu generieren. Als Ergebnis der interdisziplinären Kooperation werden hochwertige und öffentlichkeitswirksame Publikationen angestrebt.

Objective 15: Beteiligung an internationalen Organisationen und GGOS

Die FGS beteiligt sich aktiv in zahlreichen internationalen wissenschaftlichen Organisationen, vor allem im Rahmen des United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM) Subcommittee on Geodesy, der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG), der Internationalen Astronomischen Union (IAU) und der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG). Dazu gehören fundamentale Beiträge an geodätischen Infrastrukturaufgaben, die Mitwirkung in den IAG Kommissionen, der Betrieb von Daten-, Analyse- und Kombinationszentren im Rahmen der IAG Scientific Services, die Leitung des IERS Zentralbüros sowie die Beteiligung an Projekten, Studien- und Arbeitsgruppen der internationalen Organisationen. Auch weiterhin möchte die FGS sich intensiv in die internationalen Organisationen einbringen, Koordinierungsaufgaben und leitende Funktionen auf internationaler Ebene übernehmen und auf diese Weise auch künftig die Weiterentwicklung der internationalen geodätischen Forschung entscheidend mitgestalten. Hierzu beteiligt sich die FGS maßgeblich am von DGK, ÖGK und SGK aufgesetzten GGOS Affiliate D-A-CH Konsortium. Ebenso wird die FGS den Kontakt mit dem Global Geodetic Center of Excellence anstreben.

Sowohl über ihre Observatorien, von denen speziell Wettzell ein Kernelement der globalen geodätischen Infrastruktur bildet, als auch über die Wahrnehmung von Leitungsfunktionen nimmt die FGS eine Vorreiterrolle in GGOS ein. Sie stellt die aktuelle GGOS-Vizepräsidentin, leitet und betreibt maßgeblich eines der beiden GGOS-Büros (GGOS-Büro für Produkte und Standards, BPS). Die Arbeiten des GGOS BPS schaffen die Grundlagen für die Etablierung einheitlicher Standards und Konventionen für die Erzeugung geodätischer Ergebnisse und damit die Voraussetzung für einen konsistenten Raum-Zeit-Bezug. Darüber hinaus stellt die FGS die Leitung des Standing Committee for Missions sowie des Standing Committees PLATO (Performance Simulations and Architectural Trade-Offs) innerhalb des Bureau for Network and Observations. Außerdem leitet die FGS zwei der drei GGOS-Focus Areas (Unified Height System, Geodetic Space Weather Research). Die FGS unterstützt die ehrgeizigen Ziele von GGOS und strebt auch weiterhin ein intensives Engagement in GGOS an, beispielsweise durch die maßgebliche Beteiligung an der Definition von GGOS Produkten sowie der Essential Geodetic Variables.

Objective 11: Aufbereitung und Ableitung hochwertiger geodätischer Produkte

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
11.1 Oberflächengeometrie der festen Erde	11.1.1 Erzeugung von hochwertigen Koordinatenzeitreihen	DGFI FGS BKG
	11.1.2 Lokale und regionale Deformationsfelder	DGFI
11.2 Satellitenorbits	11.2.1 Bereitstellung von SLR und DORIS-Orbits für unterschiedliche geodätische und Fernerkundungssatelliten	DGFI
	11.2.2 Berechnung und Bereitstellung kombinierter Orbits	DGFI
11.3 Erdorientierungsparameter	11.3.1 Berechnung kombinierter EOP-Zeitreihen	DGFI BKG
11.4 Statische und zeitvariable Schwerefelder	11.4.1 Erzeugung von hochwertigen statischen und zeitvariablen Schwerefelder sowie von Nahe-Echtzeitmodellen für operationelle Service-Anwendungen	APG
11.5 Meeresspiegel	11.5.1 Globale und regionale Gezeitenmodelle	DGFI
	11.5.2 Globale und regionale Meeresspiegeltrends, Wellenhöhe	DGFI
	11.5.3 Meeresspiegelvariationen im offenen Ozean, in Küstennähe und in Polargebieten	DGFI BKG
	11.5.4 Dynamische Ozeantopographie und geostrophische Strömungen	DGFI
11.6 Atmosphäre	11.6.1 Ionosphärenkarten (z.B. VTEC) aus der Kombination verschiedener Beobachtungstechniken mit unterschiedlichen Latenzzeiten, einschließlich Echtzeit	DGFI
	11.6.2 Zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Elektrendichtemodelle der Ionosphäre und der Plasmasphäre	DGFI
	11.6.3 Weiterentwicklung von Thermosphärenmodellen zur Erstellung von Thermosphärenkarten	DGFI
	11.6.4 Einfluss des Weltraumwetters auf den Zustand von Ionosphäre, Plasmasphäre und Thermosphäre	DGFI
11.7 Hydrosphäre	11.7.1 Zeitreihen von Wasserständen, horizontaler Ausdehnung, Speicheränderung und Abfluss von Binnengewässern	DGFI
11.8 Kryosphäre	11.8.1 Massenvariationen von Eisschilden	APG

Objective 12: Überführung von FE-Ergebnissen in operationelle Systeme

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
12.1 Automatisierte Ermittlung und Vorhersage von Atmosphärenzuständen	12.1.1 Echtzeitmonitoring und Prädiktion von Ionosphärenzuständen unter Einbeziehung von Weltraumwetterbeobachtungen (OPTIMAP)	DGFI
	12.1.2 Erfassung und Modellierung der atmosphärischen Zustandsgrößen über Wetzell (WATSON) (s. 2.5)	GOW
12.2 Automatisierte Ermittlung von hydrologischen Parametern	12.2.1 Kontinuierliche Erzeugung von Wasserständen, Oberflächenausdehnung, Speicheränderung und Abfluss für Binnengewässer (DAHITI)	DGFI
12.3 Kombinierte Erdrotationsparameter	12.3.1 Operationelle Erzeugung kombinierter EOPs basierend auf VLBI-, GNSS- und SLR-Daten	BKG
12.4 Hochaufgelöste Schwerefeldmodelle	12.4.1 Erzeugung hochaufgelöster Schwerefeld-Kombinationsmodelle (XGM-Modellreihe)	APG

Objective 13: Outreach

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
13.1 Datenhaltung und Bereitstellung der Messdaten und geodätischen Produkte	13.1.1 Qualitätssicherung der Ergebnisse	alle
	13.1.2 Betrieb von Datenportalen wie IERS-DIS, IVS-DC, EDC, DAHITI, OpenADB, SIRGAS	BKG DGFI
	13.1.3 Langzeitsicherung der Datenhaltung	alle
13.2 Geeignete Veröffentlichung, Darstellung und Bewerbung der Produkte	13.2.1 DOIs für FGS Daten und Produkte	alle
	13.2.2 GGOS Bureau of Products and Standards	DGFI APG SGD
	13.3.3 populärwissenschaftliche Vorträge	alle
	13.3.4 Medienpräsenz	alle
13.3 Zusammenarbeit mit Entscheidungsträgern	13.4.1 Weltraumwetterstrategie	BKG DGFI

Objective 14: Ausbau der Kooperation im geowissenschaftlichen Umfeld

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
14.1 Erweiterung der interdisziplinären Zusammenarbeit	14.1.1 Initiierung von interdisziplinären Workshops und Projekten	alle
	14.1.2 Austausch von Daten und Erkenntnissen	alle
	14.1.3 Rückkopplung auf die eigene Forschung	alle
14.2 Nutzung der geodätischen Produkte in den Erdsystemwissenschaften	14.2.1 Geowissenschaftliche Interpretation der Beobachtungsergebnisse	alle
	14.2.2 Studien zur Geodynamik, Umweltveränderungen	alle
	14.2.3 Modellvalidierung und -kalibration	alle
	14.2.4 Assimilation geodätischer Ergebnisse in physikalische Modelle	alle
	14.2.5 Modellentwicklung in interdisziplinärer Zusammenarbeit	alle

Objective 15: Beteiligung an internationalen Organisationen und GGOS

Forschungsziele	Aufgaben	Partner
15.1 Kooperation in internationalen wissenschaftlichen Gremien und Organisationen	15.1.1 Mitwirkung in Projekten, Studien- und Arbeitsgruppen von UN-GGIM, Copernicus, IAG, IAU, IUGG; Anstreben von Schlüsselpositionen	alle
	15.1.2 Beteiligung an geodätischen Infrastrukturaufgaben (Betrieb von Analyse- Kombinations- und Datenzentren)	alle
	15.1.3 Fortführung der Beteiligung am internationalen Schwerereferenzsystem	BKG
	15.1.4 Wettzell als Referenzstation im IGRS	BKG
15.2 Standardisierung für einen konsistenten Raum-Zeit-Bezug	15.2.1 Evaluierung und Festlegung von Standards und Konventionen (s. 15.3.2)	DGFI APG SGD
	15.2.2 Vereinheitlichung und Implementierung von Standards und Konventionen zur Erzeugung konsistenter FGS-Produkte	alle
	15.2.3 Verfügbarmachung standardisierter FGS-Produkte	alle
15.3 Koordinationsaufgaben in IAG / GGOS	15.3.1 Leitung des IERS Central Bureaus	BKG
	15.3.2 Leitung des GGOS Bureaus of Products and Standards	DGFI
	15.3.3 Leitung von GGOS Focus-Areas	DGFI
	15.3.4 GGOS Vice President	DGFI
	15.3.5 Definition der Essential Geodetic Variables (EGVs)	DGFI APG BKG
15.4 Koordination und Planung von geodätischen Beobachtungsprogrammen	15.4.1 Mitwirkung IVS OPC	GOW
	15.4.2 Übernahme IVS OC (Migration von Bonn nach Wettzell)	GOW