



Die Bedeutung Globaler Satellitennavigationssysteme für den Alltag und für zahlreiche Vermessungsaufgaben ist jedem Nutzer bekannt. Da, wo es um Positionierungs- oder Navigationsaufgaben geht, kommen GNSS-Geräte für die Nutzung von GPS, GLONASS, Galileo oder Beidou zum Einsatz, die Koordinaten in einem Bezugsrahmen eines globalen geodätischen Bezugssystems liefern. Weniger bekannt ist, welche elementaren Aufgaben das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in der globalen Geodäsie hierzu leistet. Die Aktivitäten sind eingebunden in internationale Kooperationen, die primär von der »International Association of Geodesy« (IAG) und deren Komponenten koordiniert werden.

Die Bedeutung Geodätischer Observatorien und die Rolle des BKG für das Globale Geodätische Bezugssystem

Ausgehend von den Grundlagen globaler Bezugssysteme wird die Wertschöpfungskette im BKG von den erforderlichen geodätischen Beobachtungsverfahren über die Analyse der Beobachtungsdaten bis zur Gewinnung der Produkte und ihrer Verfügbarmachung über die hauseigenen Datenzentren vorgestellt.

Globales Geodätisches Bezugssystem

Die Einrichtung eines globalen geodätischen Bezugssystems erfordert mathematisch gesprochen die Festlegung von Ur-

sprung, Orientierung und Maßstab. Im Allgemeinen wird ein geodätisches Bezugssystem durch die Koordinaten von Bezugspunkten realisiert, sodass implizit – über die Koordinaten – Ursprung, Orientierung und Maßstab bereits eingeführt werden. Diese Realisierung eines Bezugssystems bezeichnet man als Bezugsrahmen. Dadurch, dass mittels GNSS überall die Koordinaten des aktuellen Standorts ermittelt werden können, wäre anzunehmen, dass diese Aufgabe der Festlegung doch erledigt sei. Die derzeit verfügbaren Genauigkeiten in den geodätischen Messverfah-

ren zeigen jedoch, dass sich bei globaler Betrachtung unser Planet Erde ständig verformt, sodass eine genaue Koordinatenbestimmung eines Bezugspunkts nur durch kontinuierliches Messen erreicht werden kann. Aus diesem Grunde haben sich in der Landesvermessung permanente GNSS-Stationen und die Angabe von Koordinaten mit einer Bezugsepoche durchgesetzt. Die Verwendung dieser Koordinaten ist konsistent zu dem genauesten verfügbaren erdfesten Bezugsrahmen, dem »International Terrestrial Reference Frame« (ITRF). Wie wird also die Festlegung dieses globalen

geodätischen Bezugssystem realisiert und kontrolliert?

Bei näherer Betrachtung zeigt sich eine Schwäche aller Satellitensysteme: Die Genauigkeit der Positionsbestimmung ist begrenzt durch die Genauigkeit der Satellitenbahnen. Für ein genaues Bezugssystem geht es darum, die Satellitenbahnen so genau wie möglich zu bestimmen. Satelliten in ihrem Orbit sind jedoch verschiedenen Kräften ausgesetzt. Es gibt die ortsbezogenen gravitativen Kräfte der Erde, des Mondes und der Sonne (nebst der der Planeten), die je nach Konstellation die Bewegung des Satelliten von einer rein theoretisch berechenbaren Ellipse als ideale Bahnkurve abweichen lassen. Eine andere Kraft ist der Strahlungsdruck der Sonne, der auf alle Flächen des Satelliten wirkt und zeit-variabel zu Abweichungen des Orbits führt. Sehr stabile Orbits lassen sich mit passiven Satelliten erreichen, die in Kugelform mit Retroreflektoren bestückt sind und für die Entfernungsmessung mit Laserpulsen aus Satellite Laser Ranging (SLR)-Systemen zur Verfügung stehen, z. B. LAGEOS, Etalon.

Ursprung

Geodäten berechnen über die Satellitenorbits die Position des Erdmassenzentrums, das mit einem Brennpunkt eines elliptischen Orbits zusammenfällt und nicht notwendigerweise mit dem rein geometrischen Mittelpunkt der Erde identisch ist. Für die Bestimmung des Massenzentrums der Erde ist nicht nur die Masse des festen Erdkörpers relevant, sondern auch die Masse der Ozeane und der Atmosphäre. Der Ursprung eines globalen Bezugssystems wird aus praktischen Überlegungen mit dem Erdmassenzentrum identifiziert, da sich die meisten Bauwerke auch an der Lotlinie (zum Erdmassenzentrum) ausrichten.

Orientierung

Die Festlegung der Orientierung eines globalen Bezugssystems mit Satellitensystemen allein ist unbefriedigend, da nicht nur die Satellitenbahnen sich mit der Zeit verändern, sondern auch die Erdrotationsachse und Rotationsgeschwindigkeit durch Vorgänge im Erdinneren, an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre. Wenn sich zwei Körper unterschiedlich bewegen, lassen sich diese in einem mathematischen Modell der Relativbewegung Erde-Satellit nicht voneinander trennen, sie sind miteinander

korreliert. Eine Festlegung der Orientierung nur mit Satelliten ist folglich ungenügend, da so ein System mit der Zeit driftet und immer ungenauer werden würde. Für die Festlegung der Orientierung muss der Geodät deshalb auf eine von Satelliten unabhängige Methode zurückgreifen, die den Einflussbereich des Gravitationsfeldes der Erde überwindet. Gesucht ist ein Inertialsystem, das keinen Beschleunigungen, also Kräften, ausgesetzt ist. So wie früher auf den Katalog der optischen Fixsterne zurückgegriffen wurde, werden heute mit Radioteleskopen die noch etwa 100 Millionen Mal entfernten Quasare weit außerhalb unserer Galaxis beobachtet, was zu einer höheren Genauigkeit führt. Quasare sind aktive Kerne von Galaxien, die aus einem Millionen bis Milliarden Sonnenmassen schweren Schwarzen Loch und einer umgebenden Gasscheibe bestehen. Das Gas wird nach und nach von dem Schwarzen Loch verschlungen und sendet dabei extrem starke Licht- und Radiostrahlung ab. Die meisten Quasare sind mehr als eine Milliarde Lichtjahre entfernt. Die verwendete Methode der »Very Long Baseline Interferometry« (VLBI) ist das genaueste derzeit bekannte Messverfahren zur Bestimmung der Erdorientierung gegenüber diesen Fixpunkten. Der Vorteil der großen Entfernung der Quasare liegt in einer relativen Ortsunveränderlichkeit (innerhalb einer humanen Lebensspanne von 100 Jahren). Die natürlichen Radioquellen bilden als Quasi-Inertialsystem den raumfesten Bezugsrahmen (»International Celestial Reference Frame«, ICRF), in welchem die Erdrotationsparameter bestimmt werden können. Damit sind die ak-

tuelle Orientierung der Erdrotationsachse und vor allem die Rotationsgeschwindigkeit der Erde bekannt. Letztere wird landläufig mit einer Umdrehung in 24 Stunden angenommen, aber durch diverse äußere Einflüsse – vor allem Massenverlagerungen in der Atmosphäre – variiert die Rotationsgeschwindigkeit signifikant. Nur wenn dies bei der Satellitenbahnberechnung berücksichtigt wird, können dank VLBI auch die Abweichungen der Bahnkurve der Satelliten wesentlich genauer bestimmt werden. Erst dadurch werden die heutigen GNSS-Genauigkeiten möglich.

Maßstab

Für die Festlegung eines Maßstabs in einem globalen Bezugssystem ist die Zeit gefragt. In den SI-Einheiten ist die Zeitsekunde als primäre Einheit definiert, die sich von der Eigenfrequenz eines langzeitstabilen Cäsium-Normals ableitet. Die sekundäre Einheit Meter wird erst über die Definition der Lichtgeschwindigkeit c in „Meter pro Sekunde“ eingeführt. Alle drei wichtigen geodätischen Raumverfahren VLBI, SLR und GNSS (und auch das vierte Raumverfahren DORIS, ebenfalls ein Satelliten-Messverfahren basierend auf Mikrowellen-Signalen zwischen Bodenstationen und Satelliten) lassen sich auf Zeitintervallmessungen zurückführen. Da die Zeithaltung mit Atomuhren auch an geodätischen Observatorien geleistet wird, ist der Atomuhrenmaßstab in den Messungen eingeführt. Die Umrechnung von gemessenen Zeitintervallen in metrische Distanzen erfolgt durch Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit.



Bild 1: Geodätisches Observatorium Wettzell mit 20-m Radioteleskop im Vordergrund, den beiden 13-m TWIN-Teleskopen rechts im Hintergrund und der Kuppel des Laserentfernungsmesssystems SOS-W (links)



Bild 2: Argentinean-German Geodetic Observatory (AGGO) in der Nähe von La Plata, Provinz Buenos Aires

Selbstverständlich definiert jedes Messverfahren einen Bezugspunkt in dem technikspezifischen globalen Bezugsrahmen, d. h. der Dipol einer GNSS-Antenne definiert den Bezugspunkt für GNSS, die Achsenschnittpunkte der Teleskope definieren die räumlichen Bezugspunkte für VLBI und SLR. Um die unterschiedlichen Messverfahren im ITRF verknüpfen zu können, müssen diese Bezugspunkte durch ein lokales Vermessungsnetz mit höchster Genauigkeit regelmäßig vermessen werden. Nur durch den lokalen Bezug lassen sich die Vorteile der einzelnen geodätischen Messverfahren zusammenführen. Das ITRF ist die derzeitige beste Realisierung eines globalen Bezugssystems, das regelmäßig aktualisiert wird. Das aktuell in der Berechnung befindliche ITRF2020 wird Messbeiträge bis Ende 2020 beinhalten und wird im Laufe des Jahres 2021 als neuer offizieller Bezugsrahmen verfügbar werden. Die ITRFs sind globale Bezugsrahmen, die bei Verwendung von ITRF-Bezugspunkten eine Verdichtung durch kontinentale (EUREF) und nationale Bezugsrahmen (DREF) ermöglichen. So wird die globale Koordinatenfestlegung mit Ursprung, Orientierung und Maßstab in den nachgeordneten Bezugsrahmen, wie z. B. EUREF und DREF, eingeführt. Die Geodätischen Observatorien, die mit allen geodätischen Raumverfahren mit permanenten Beobachtungen über lange Zeiträume beteiligt sind, werden Fundamentalstationen genannt (Hase, 2020). Die Festlegung eines globalen Bezugssystems wird periodisch über aktuelle Bezugsrahmen, die mit Fundamentalstationen verknüpft sind, nachgeführt.

Ausstattung eines Geodätischen Observatoriums

Mit den vorstehenden Ausführungen wird verständlich, dass an einem modernen Geodätischen Observatorium, das als Fundamentalstation konzipiert ist, wenigstens folgende Instrumente zu finden sein sollten:

- Radioteleskop für geodätische VLBI-Messungen
- optisches Teleskop mit Lasersystem für Satellitenbahnvermessung mittels SLR
- Permanentstation für GNSS
- redundante Frequenznormale zur Zeithaltung und Referenzfrequenz
- Gravimeter zur Erfassung des aktuellen Potentials des Erdschwerefelds und der Erdgezeiten
- Präzisionsvermessungsausrüstung zur Verknüpfung lokaler Bezugspunkte
- komplementäre Instrumente zur Steigerung der Beobachtungsgenauigkeit, z. B. meteorologische Sensoren für die Refraktionskorrektur

Das BKG betreibt derzeit zwei Observatorien, die den Merkmalen einer Fundamentalstation entsprechen. Im Bayerischen Wald bei Bad Kötzing gibt es das Geodätische Observatorium Wettzell (GOW) seit fast 50 Jahren, das in einer Zusammenarbeit des BKG mit der TU München aufgebaut wurde (Bild 1). Diese starke Heimatbasis erlaubt seit 2015 die Schaffung eines zweiten Standbeins im globalen ITRF-Netzwerk in Argentinien. Dort wird vom BKG in Zusammenarbeit mit dem argentinischen Wissenschaftsbeirat das »Argentinean-German Geodetic Observatory« (AGGO) in der

Nähe von La Plata, Provinz Buenos Aires, aufgebaut (Bild 2). Als drittes Standbein wird seit 1992 die German Antarctic Receiving Station (GARS) des DLR auf der chilenischen Antarktisstation O'Higgins gemeinschaftlich auch für geodätischen Messungen genutzt.

Nachfolgend werden beispielhaft einige der in Wettzell betriebenen Instrumente vorgestellt.

Radioteleskope für VLBI

Aufgrund ihrer Größe sind die Radioteleskope das sichtbarste Merkmal einer Fundamentalstation. In Wettzell ist seit 1983 ein 20-Meter-Radioteleskop für Beobachtungen von Quasaren im Einsatz, aus denen die Erdrotationsparameter abgeleitet werden (Bild 1). Kein anderes Radioteleskop hat weltweit mehr Beobachtungen für diesen Zweck gemacht. Im Zuge technischer Weiterentwicklungen wurde im »International VLBI Service for Geodesy and Astrometry« (IVS) ein neues Konzept für das »VLBI Global Observing System« (VGOS) erdacht, welches mit dem Aufbau eines VGOS-Beobachtungsnetzes für das »Global Geodetic Observing System« (GGOS) der IAG seinen Widerhall gefunden hat. Wettzell hatte hier die Vorreiterrolle übernommen und von 2008 bis 2011 das Twin Teleskop Wettzell (TTW) errichtet (Bild 1 rechts). Das TTW besteht aus zwei redundant ausgelegten 13,2-Meter Radioteleskopen, um einen 24-Stunden-/7-Tage-Service leisten zu können. Sie lassen sich in weniger als 20 Sekunden zu jeder beliebigen Himmelsposition bewegen, sind mit Breitband-Empfangssystemen ausgestattet, ermöglichen fast die zehnfache Beobachtungsmenge im Spektrum von 2-14 GHz im Vergleich zum 20-Meter-Radioteleskop (2,1-2,4; 8,1-8,9 GHz) und können damit bis zu 2.880 Quasare in 24 Stunden messen. Durch diese technische Weiterentwicklung wird eine Genauigkeitssteigerung der Erdrotationsparameter und des globalen Bezugsrahmens erwartet.

Das interferometrische Messverfahren VLBI bedingt, dass wenigstens zwei Radioteleskope dieselbe Radioquelle simultan beobachten – sie bilden eine sogenannte Basislinie. Idealerweise sollten beide Radioteleskope sehr weit voneinander entfernt sein, daher sind inter-kontinentale Basislinien üblich. Durch die Form der Erde befindet sich in dem Interferometer ein Radiotele-

leskop etwas näher zum Quasar, wodurch sich ein kleiner Zeitunterschied in der Ankunft der kohärenten Strahlung des Quasars ergibt. Als „Signal“ wird von Quasaren nur weißes Rauschen empfangen, digitalisiert, mit Zeitmarken versehen und aufgezeichnet. In einem anschließenden Korrelationsprozess werden diese Beobachtungsdaten von allen ko-beobachtenden Stationen zusammengeführt, um die kohärenten Rauschanteile der Radioquelle zu finden. Anhand der Zeitmarken lässt sich bei Maximierung der Korrelationsfunktion ein Laufzeitunterschied zwischen den Empfangsstationen bestimmen. Die Interferenzfrequenz wird durch die Erdrotation verursacht und erlaubt direkten Zugriff auf die Erdrotationsgeschwindigkeit. Eine entsprechende Modellierung der Beobachtungsbedingungen erlaubt die Bestimmung von Koordinaten des Rotationspols, Stationskoordinaten und von interkontinentalen Basislinien (1.000 – 10.000 km) mit wenigen Millimetern als Unsicherheit.

Die Datenübertragung von den Beobachtungsstationen zum Korrelator erfolgt zu meist über Kommunikationsnetze. In 24 Stunden Beobachtungszeit fallen einige Terabyte an Beobachtungsdaten an, die zu einem Korrelationszentrum zu übertragen sind. Derzeit können kleine Beobachtungsnetze bereits in Wettzell korreliert werden. Ein Ausbau erfolgt in den kommenden Jahren.

Der IVS koordiniert die Beobachtungsprogramme und die daran anschließende Datenanalyse bei den Analyse- und Kombinationszentren.

Optische Teleskope für Laserentfernungsmessung zu Satelliten

Bei der Laserentfernungsmessung wird mit einem optischen Teleskop ein Objekt im erdnahen Raum angezielt und mit sehr kurzen Laserpulsen von z. T. nur 10 Pikosekunden Dauer (das entspricht einer Lichtscheibe von 3 mm Dicke) beschossen. Satelliten tragen zu diesem Zweck einen Retroreflektor oder ein Array mit mehreren einzelnen Retroreflektoren, sogar auf dem Mond wurden Arrays mit Retroreflektoren von der amerikanischen Apollo-Mission und der russischen Luna-Mission errichtet. Der zurückkommende Laserpuls wird am Teleskop detektiert und das Zeitintervall zwischen Ausgang und Eingang des Pulses am Teleskop, multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit, entspricht der doppelten Entfernung zwischen



Bild 3: Laserentfernungsmesssystem WLRs mit Betriebsgebäude und Kombinationstarget (links)

Teleskop und Reflektor.

Nachdem in Wettzell seit den frühen 70er Jahren Erfahrungen in der Laserentfernungsmessung gesammelt wurden, stehen heute zwei produktive Systeme für Beobachtungen zur Verfügung. Seit 1989 ist das »Wettzell Laser Ranging System« (WLRs) in Betrieb (Bild 3). Ausgestattet mit einem 75-cm-Spiegelteleskop zum Senden und Empfangen, einem sogenannten monostatischen System, können damit auch Messungen zu 25.000 km entfernten GNSS-Satelliten und sogar bis zum Mond durchgeführt werden. Auch hier haben technische Weiterentwicklungen und die starke Zunahme der zu beobachtenden Satelliten dazu geführt, dass eine Neukonzeption erforderlich wurde. Das speziell in Hinblick auf »tief fliegende« Satelliten, wie z. B. die Schwerefeldsatelliten GRACE und GOCE, optimierte »Satellite Observing System Wettzell« (SOS-W) kann mit seinem 16-cm-Sende- und dem 50-cm-Empfangsteleskop Pulsraten bis zu 1000 Hz realisieren (Bild 4). Dieses System wurde in Eigenentwicklung für automatische Satellitenverfolgung ausgelegt und ist seit 2015 im Einsatz.

Die SLR-Aktivitäten werden vom »International Laser Ranging Service« (ILRS) koordiniert. Ihm sind auch Analysezentren angeschlossen, die die entsprechenden Orbits, Erdrotationsparameter und vor allem das Massenzentrum der Erde aus den Messungen berechnen.

GNSS-Permanentstationen und DORIS

Es werden mehrere GNSS-Stationen in Wettzell, im AGGO und auf der Antarktischen

station O'Higgins als Permanentstationen betrieben, die vor allem im Kontext der Kollimation mit den anderen geodätischen Raumverfahren von Bedeutung sind. Da in Wettzell seit den 80er Jahren und in O'Higgins seit Mitte der 90er Jahre permanente GNSS-Messungen durchgeführt werden, stehen hier lange Zeitreihen zur Verfügung. Die Daten werden über das BKG, den »International GNSS Service« (IGS) und das »European permanent GNSS reference network« (EUREF) zur Verfügung gestellt. Eine GNSS-Station

Bild 5: Kugelsatellit LAGEOS-1 (Laser GEOdynamics Satellite-1), in der Erdumlaufbahn seit 1976

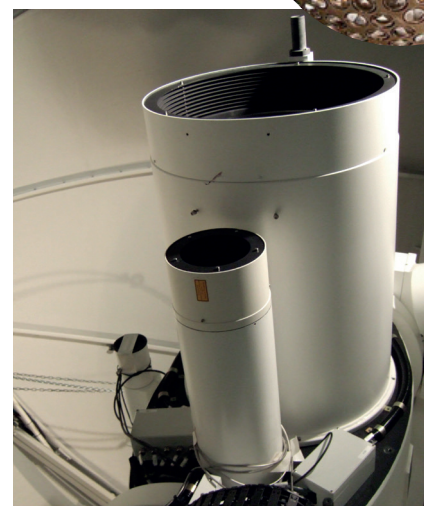


Bild 4: Teleskop des Laserentfernungsmesssystems SOS-W



Bild 6: GNSS-Beobachtungsturm mit Stationen WTZA, WTZZ und WTZR



Bild 7: DORIS-Antenne in Wettzell, Station WEUC

des nationalen GREF-Netzwerkes liefert Echtzeit-Korrekturdaten im NTRIP-Protokoll (NTRIP, Networked Transport of RTCM via Internet Protocol).

GPS spielt auch bei der Zeitübertragung eine wichtige Rolle. Spezielle GPS-Zeitempfänger sind an den Observatorien mit einer Atomuhr verbunden. Mittels einer spezifischen Auswertung lassen sich Zeitunterschiede zwischen diesen Atomuhren bestimmen. Zeitvergleiche mit dem BIPM (Bureau International des Poids et Mesures = Internationales Büro für Maß und Gewicht) erlauben eine Anknüpfung an die Weltzeit UTC.

Seit 2016 ist in Wettzell auch eine Bodenstation des französischen Dopplersystems DORIS in Betrieb. Hierbei steht die Ko-Lokation des DORIS-Systems mit den geodätischen Raumverfahren VLBI und SLR im Vordergrund. Damit ist Wettzell eine von weltweit vier Stationen, auf denen alle vier

geodätischen Raumverfahren an einem Ort betrieben und die Verbindungsvektoren zwischen den einzelnen Referenzpunkten mit hoher Genauigkeit bekannt sind. Wie bei den anderen Verfahren auch werden die Aktivitäten vom »International DORIS Service« (IDS) koordiniert.

Gravimeter

Die geometrischen Beobachtungsverfahren des GOW werden durch gravimetrische Messverfahren ergänzt. Diese beobachten die lokale Schwerebeschleunigung sowie ihre zeitlichen Veränderungen. In Wettzell werden zwei supraleitende Relativgravimeter (Typ GWR OSG) betrieben, die den zeitlichen Verlauf der Schwerebeschleunigung mit höchster Genauigkeit beobachten können. Das neue Gravimeterhaus des GOW ist eine gravimetrische Referenzstation im Internationalen Schwerereferenzsystem und ermöglicht mit vier Beobachtungspfeilern metrologische Vergleiche von Absolutgravimetern. Die klassischen Freifallgravimeter vom Typ FG5 und A10, die das BKG seit mehr als 20 Jahren im Einsatz hat, aber auch das neue Quantengravimeter AQG-A (Ménot et al., 2018) werden hier messtechnisch überprüft. Gleichzeitig garantieren diese Messungen, gemeinsam mit denen von vielen internationalen Gastgravimetern, dass das absolute Schwereniveau an diesem Ort mit höchster Genauigkeit bekannt ist. Durch die Kombination der relativen und der absoluten gravimetrischen Messverfahren kann so am GOW eine Schwerereferenzfunktion bereitgestellt werden, die zu jedem Zeitpunkt einen metrologisch abgesicherten absoluten

Referenzschwerewert mit höchster Genauigkeit liefert. Wettzell ist damit auch der zentrale Referenzpunkt für die nationalen Schwerenetze des Bundes und der deutschen Landesvermessung.

Die hier durchgeführten internationalen Vergleiche von Absolutgravimetern sichern die Konsistenz weltweiter Absolutschweremessungen für die Realisierung des Internationalen Schwerereferenzsystems (Wziontek et al., 2020).

Die Gravimeterdaten werden über den »International Gravity Field Service« (IGFS) zur Verfügung gestellt.

Lokale Präzisionsvermessung

Eine wichtige Aufgabe einer Fundamentalstation besteht in der präzisen Vermessung der Referenzpunkte, um daraus die Verbindungsvektoren zwischen den Messsystemen abzuleiten. Damit ist es möglich, die globalen Analyseergebnisse der einzelnen Verfahren auf ihre Konsistenz hin zu überprüfen. Darüber hinaus werden die Verbindungsvektoren (engl. ‚local ties‘) auch als zusätzliche Beobachtung verwendet, um die verschiedenen Raumverfahren miteinander zu kombinieren.

Während es bei stationären Antennen (GNSS, DORIS) einen definierten Antennenreferenzpunkt gibt, muss bei den beweglichen Teleskopen der Referenzpunkt konstruiert werden. Hierzu wird eine Vielzahl von Beobachtungen zu Zielprismen, die an der Teleskopstruktur angebracht sind, bei verschiedenen Teleskopstellungen durchgeführt, um daraus den Schnittpunkt der Teleskopachsen, der den Referenzpunkt darstellt, zu bestimmen. Die lokale Vermes-

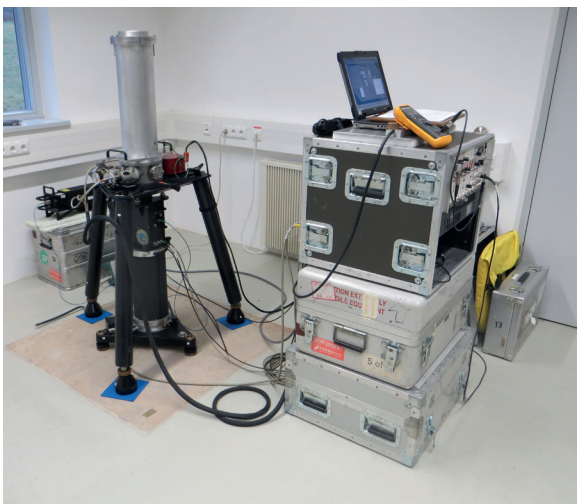


Bild 8: Absolutgravimeter FG5-101 des BKG

sung erfolgt durch 3D-Messungen mit Totalstationen (s. Titelbild) und Präzisionsnivelements; für die Transformation in das geozentrische System werden GNSS-Messungen an gemeinsamen Passpunkten durchgeführt. Für die ungestörte GNSS-Messung während einer lokalen Vermessung wurde das „Wetzell-Combi-Target“ entwickelt, ein zentrisch unter die GNSS-Antenne montierter Retroreflektor für eine Anmessung durch die Totalstation.

Die Ergebnisse werden über den »International Earth Rotation and Reference Systems Service« (IERS) zur Verfügung gestellt, da sie für die Generierung des ITRF erforderlich sind.

Von den Beobachtungen bis zum Produkt

Der Ausgangspunkt für die Realisierung eines globalen geodätischen Bezugssystems sind die mit den verschiedenen Instrumenten gewonnenen Beobachtungsdaten global verteilter Beobachtungsstationen. Dabei fällt den Fundamentalstationen, die mehrere Messverfahren vereinen, eine besondere Bedeutung zu, da nur durch sie die Verknüpfung der verschiedenen geodätischen Beobachtungsverfahren erfolgen kann.

Die IAG-Dienste

Die »International Association of Geodesy« (IAG) koordiniert die Datengewinnung, Datenanalyse und Bereitstellung der Produkte des Globalen Geodätischen Bezugssystems.

Innerhalb der IAG-Dienste werden »Datenzentren« zur Speicherung der Beobachtungsdaten, »Analysezentren« zur Auswertung der Beobachtungsdaten und Produktgenerierung sowie »Kombinationszentren« zur Kombination der Produkte der verschiedenen Analysezentren und zur Bereitstellung der kombinierten technikspezifischen Produkte unterschieden. Dabei gibt es in allen Diensten verschiedene Produktlinien mit unterschiedlichen Latenzzeiten. Somit werden sowohl Anwendungen im Echtzeit-(nahen)-Bereich unterstützt, als auch Nutzer, für welche die größtmögliche Genauigkeit entscheidend ist und weniger die Frage, ob sie ihre Anwendung innerhalb weniger Stunden oder Tage durchführen müssen.

Diese technikspezifischen Produkte werden wiederum im IERS zusammengeführt und zu einem finalen Produkt, z. B. dem ITRF, kombiniert. Bild 12 veranschaulicht

den Datenfluss durch die verschiedenen Dienste. Für alle Daten und Produkte der IAG-Dienste gilt der Grundsatz der Open-Data-Politik, da die Realisierung eines globalen Bezugssystems nur durch die Zusammenarbeit zahlreicher Institutionen ermöglicht werden kann. Für die meisten Produkte gibt es unterschiedliche Produktreihen, die sich in Verfügbarkeit und Genauigkeit unterscheiden. Produkte mit einer kurzen Latenzzeit, d. h. einer kurzen Zeitspanne zwischen Datengewinnung und Verfügbarkeit der Produkte, haben in der Regel geringere Genauigkeitsanforderungen als Produkte mit hohen Latenzzeiten, die durch aufwendigere Analysen erstellt werden.

Produkte des Globalen Geodätischen Bezugssystems

Die Realisierung eines Globalen Geodätischen Bezugssystems erfolgt durch Berechnung eines sogenannten Bezugsrah-

mens basierend auf geodätischen Beobachtungen. Es werden zwei grundlegende Bezugsrahmen unterschieden, ein raumfester und ein erdfester Bezugsrahmen. Im raumfesten Bezugsrahmen lassen sich die Satellitenbahnen physikalisch beschreiben. Den international vereinbarten raumfesten Bezugsrahmen nennt man »International Celestial Reference Frame« (ICRF). Der erdfeste Bezugsrahmen, den wir für die Positionierung auf der Erde benötigen, wird über Positionsangaben (3-dimensionale Koordinaten) global verteilter Referenzstationen realisiert und wird als »International Terrestrial Reference Frame« (ITRF) bezeichnet. Den Übergang vom raumfesten in den erdfesten Bezugsrahmen beschreiben die sogenannten Erdorientierungsparameter (EOP). Alle drei Produkte zusammen (ICRF, ITRF, EOP) realisieren das Globale Geodätische Bezugssystem. Die Wichtigkeit der Konsistenz zwischen diesen drei Produkten wurde mit der IAG-



Bild 9: Supraleitgravimeter GWR OSG SG030 im neuen Gravimeterhaus des GOW (Foto: BKG)



Bild 10: Absolute Quantum Gravimeter AQG-A02 (Foto: BKG)



Bild 11: Das Combi-Target ermöglicht gleichzeitige Vermessung und GNSS-Beobachtung

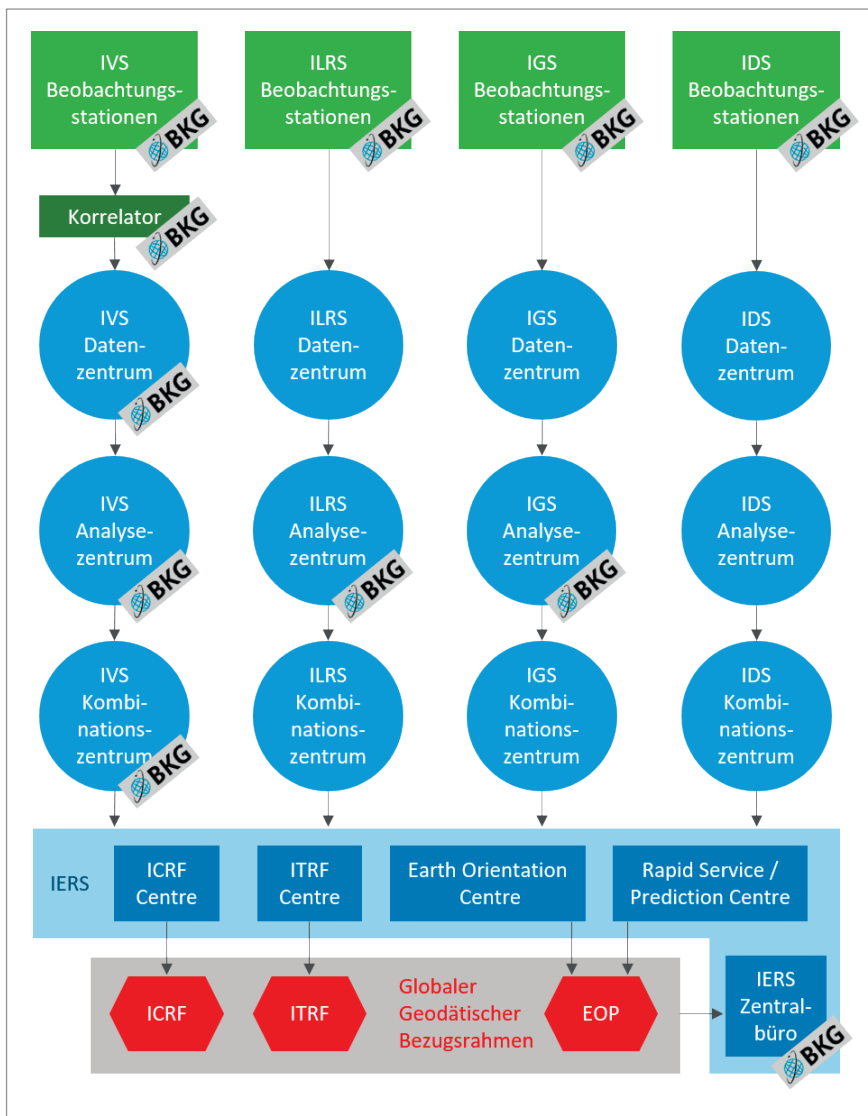


Bild 12: Datenfluss der IAG-Dienste zur Realisierung eines Globalen Geodätischen Bezugsystems. Das BKG ist in allen markierten Beiträgen aktiv involviert.

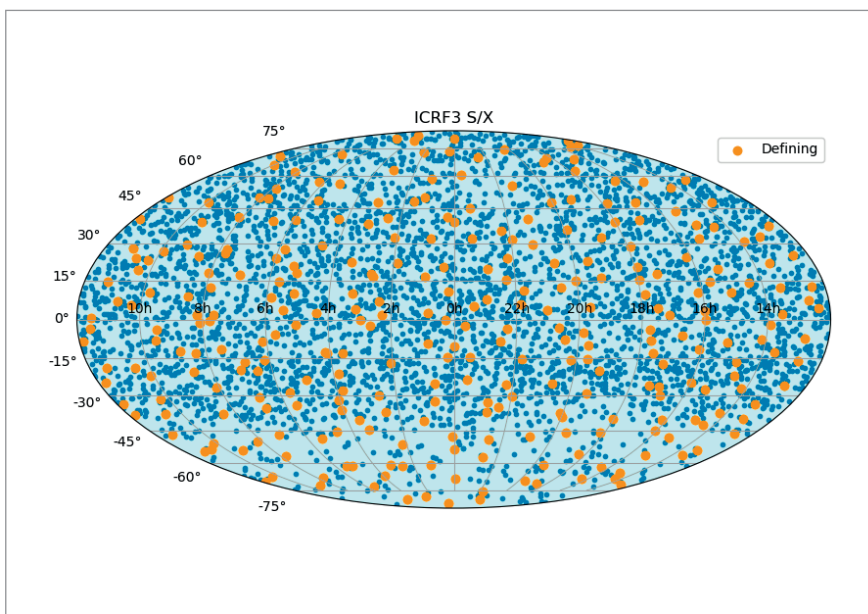


Bild 13: Quasare des ICRF3 (Quelle: IERS ICRS Center hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/)

Resolution Nr. 2 der 27. IUGG-Generalversammlung nochmals bestätigt (siehe IAG, 2019): „The IAG recommends, [...] that highest consistency between the ICRF, the International Terrestrial Reference Frame (ITRF), and the Earth Orientation Parameters (EOP) should be a primary goal in all future realizations.“

Raumfester Bezugsrahmen – ICRF

Der raumfeste Bezugsrahmen ICRF ist die Realisierung des dazugehörigen raumfesten Bezugssystems ICRS (International Celestial Reference System) und wird benötigt, um die Lage der Erde und ihre Rotation im Raum bestimmen zu können. Im ICRF ist festgelegt, dass sich der Mittelpunkt des Systems im Massenmittelpunkt der Sonne befindet (auch Baryzentrum genannt). Das System ist ein raumfestes (inertiales) System, das sich gegenüber dem Gesamtsystem der Galaxien nicht dreht.

Der ICRF wird mittels VLBI-Beobachtungen zu Quasaren bestimmt. Mit Hilfe von VLBI-Beobachtungen aus den letzten 40 Jahren kann man einen Katalog an Quasarpозиtionen (Rektaszension und Deklination) bestimmen, der in seiner aktuellen Auflage 4536 Quasare enthält. 1998 wurde die erste Realisierung mit dem ICRF1 vorgestellt, der damals 608 Quasare enthielt. Später kamen Erweiterungen hinzu und 2009 wurde der ICRF2 eingeführt. Dieser wurde dann von dem heute gültigen ICRF3 abgelöst, der 2018 auf der XXXth General Assembly der International Astronomical Union (IAU) verabschiedet wurde. Die IAG hat mit ihrer Resolution Nr. 2 der 27. IUGG-Generalversammlung den ICRF3 als neuen Standard für alle geodätischen und astrometrischen Anwendungen empfohlen (siehe IAG, 2019).

Erdfester Bezugsrahmen – ITRF

Der erdfeste Bezugsrahmen ITRF ist die Realisierung des dazugehörigen Bezugssystems ITRS (International Terrestrial Reference System). Das ITRS ist ein mit der Erde rotierendes System, dessen Ursprung im Massenzentrum der Erde liegt. Die Z-Achse bildet die mittlere Rotationsachse der Erde. Die X-Achse liegt in der Greenwich-Meridianebene und die Y-Achse komplettiert das rechtshändige Koordinatensystem.

Der ITRF besteht derzeit aus etwa 400 verschiedenen Referenzpunkten (Bild 14), d. h. Koordinaten von Beobachtungsstationen der verschiedenen Beobachtungsver-

fahren GNSS, SLR, VLBI und DORIS. Diese Beobachtungsstationen verwenden mindestens ein Beobachtungsverfahren, als Fundamentalstation bedienen sie hingegen alle Beobachtungsverfahren. Der ITRF wird laufend aktualisiert. Derzeit ist der ITRF2014 (http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/) in Benutzung. Eine Aktualisierung zum ITRF2020 wird gerade vorbereitet und soll ab Mitte 2021 verfügbar sein. Insgesamt arbeiten drei ITRS-Kombinationszentren am neuen ITRF: IGN (Paris, Frankreich), DGFI-TUM (München, Deutschland), NASA-JPL (Pasadena, USA). Da unterschiedliche Kombinationsmethoden bei den drei Institutionen zum Einsatz kommen, ist eine unabhängige Qualitätskontrolle des ITRF gegeben.

Die Bedeutung des ITRF wurde mit der IUGG-Resolution Nr. 2 und der IAG-Resolution Nr. 1 der jüngsten IUGG-Generalversammlung erneut hervorgehoben (siehe IUGG, 2019, und IAG, 2019): Der ITRF soll der Standard-Bezugsrahmen für Positionierung, Satellitennavigation und erdwissenschaftliche Anwendungen sowie auch der Standard für Definition und Anbindung nationaler und regionaler Referenzrahmen sein.

Erdorientierungsparameter (EOP)

Die Erdorientierungsparameter gestatten es, für jeden Moment die Lage der Erde im Weltraum zu beschreiben. Mathematisch gesehen sind die EOP Transformationsparameter zwischen dem erdfesten und dem raumfesten Bezugsrahmen. Gegenüber ihrer Achse taumelt der Erdkörper um mehrere Meter, teils periodisch, teils irregulär. Dies wird durch zwei rechtwinklige Koordinaten x und y , die sogenannten »Polkoordinaten«, beschrieben. Sie geben die Lage des Rotationspols gegenüber dem erdfesten Bezugsrahmen an. Die Drehung der Erde um ihre Achse wird durch den Parameter »Universal Time (UT1)« angegeben. Man kann sich dies so vorstellen, als ob am Nullmeridian ein Zeiger angebracht ist, der während der 24-stündigen Drehung über den Himmel streicht; statt eines Ziffernblatts geben die Quasare die momentane Stellung des Zeigers an. Die veränderliche Rotationsgeschwindigkeit der Erde lässt sich auch durch die Tageslänge (Length of Day, LOD) ausdrücken, die angibt, um wie viele Millisekunden der aktuelle Tag von 24 Stunden abweicht. Außerdem bewegt sich die Rotationsachse der Erde gegenüber dem raumfesten Bezugsrahmen. In etwa 26.000

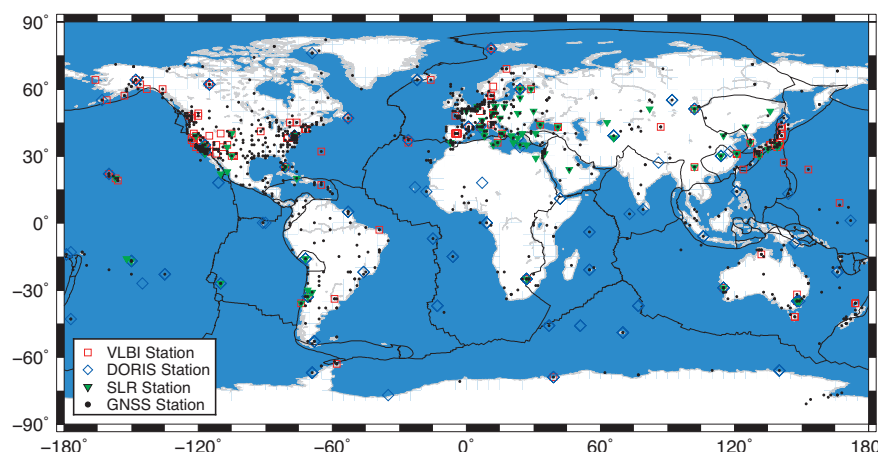


Bild 14: Beobachtungsstationen des ITRF2014

Jahren beschreibt sie einen Kegel, der mit dem Parameter »Präzession« dargestellt wird. Zudem schwankt sie hin und her, was durch die »Nutation« beschrieben wird.

Es gibt verschiedene EOP-Produktreihen. Die für den Anwender wesentlichste Unterscheidung liegt in der Verfügbarkeit der Reihen. Tägliche und wöchentliche Aktualisierungen inklusive Prädiktionen werden vom IERS Rapid Service/Prediction Centre als »Rapid“-Produkt, dem IERS Bulletin A, bereitgestellt. Diese beruhen auf den neuesten Beobachtungen. Monatlich aktualisierte Zeitreihen mit einem höheren Genauigkeitsanspruch für Langzeitstudien der EOP (IERS Bulletin B, vergleichbar mit einem »Final“-Produkt) werden vom IERS Earth Orientation Centre generiert.

BKG-Beiträge im Rahmen der IAG-Dienste

Das BKG ist sehr aktiv an den IAG-Diensten und insbesondere in allen Gliedern der Verarbeitungskette – von den Beobachtungen bis hin zur Produktgenerierung und Bereitstellung – beteiligt. Es betreibt nicht nur drei geodätische Observatorien, sondern auch verschiedene Daten-, Analyse- und Kombinationszentren der technikspezifischen IAG-Dienste sowie das IERS-Zentralbüro.

IVS-Datenzentrum

Aufgabe des IVS-Datenzentrums ist neben der Verwaltung des sich ständig vergrößernden VLBI-Datenbestandes die zeitnahe Bereitstellung der VLBI-Datenbasen (Ergebnis der Korrelation der VLBI-Beobachtungsdaten) sowie der daraus abgeleiteten Ergebnisse und Produkte (siehe <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/products-data/products.html>) für die verschiedenen nationalen und internationalen Analyse- und Kombinations-

zentren. Von weltweit verteilten VLBI-Stationen werden Daten erfasst und nach der Korrelation in Form von VLBI-Datenbasen im IVS-Datenzentrum gespeichert.

Strukturell ist das IVS-Datenzentrum an drei primären Standorten etabliert, beim Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS/Goddard Space Flight Center, USA) in den USA, beim Paris Observatory (OPAR, Frankreich) und eben beim BKG (<ftp://ivs.bkg.bund.de/pub/vlbi/>). Die Konsistenz der Datenbestände, die aktuell etwa 300 GB umfassen, wird über stündliche Synchronisierungsprozesse erreicht, auch um die an einem Standort neu eingelieferten Datenbasen und IVS-Produkte im gesamten IVS-Datenzentrum zur weiteren Nutzung bereitstellen zu können. Eine Übersicht zum IVS-Datenzentrum sowie zu Funktion und Standorten ist auf der IVS-Webseite <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/org/components/dc-list.html> zu finden.

IVS-Analysezentrum

Das IVS-Analysezentrum am BKG verarbeitet seit 1999 die im IVS-Datenzentrum abgelegten Datenbasen weiter, um Produkte zur Bestimmung der geodätischen Bezugssysteme einschließlich der Erdorientierungsparameter (EOP) zu generieren (Engelhardt et al., 2020).

Die EOP-Produkte mit dem kompletten Satz der EOP werden in Form von Zeitreihen erstellt, welche Ergebnisse der Analyse von VLBI-Beobachtungssessionen mit 24 Stunden Messdauer enthalten. Diese regulären globalen VLBI-Beobachtungen werden zwei Mal pro Woche durchgeführt. In der Regel nehmen an diesen Beobachtungen 8-13 weltweit verteilte VLBI-Stationen teil.

Um möglichst zeitnah die quasi-tägliche Rotation der Erde um ihre Achse (UT1) zu

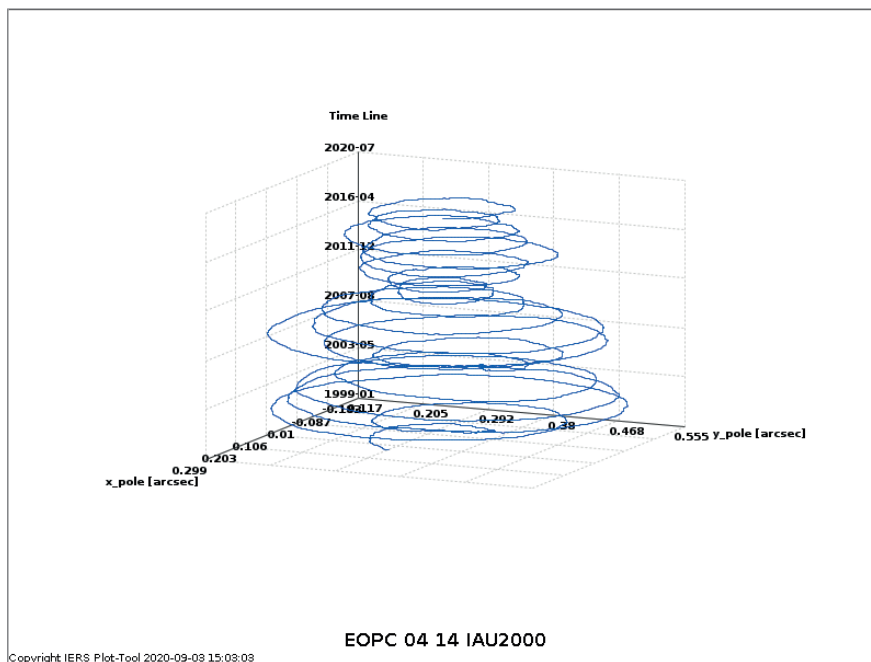


Bild 15: Die Bewegung des Rotationspols der Erde seit 1999. Die Polkoordinaten werden in Bogensekunden (arcsec) angegeben, wobei einer Bogensekunde etwa 30 Meter auf der Erdoberfläche entsprechen.

bestimmen, werden dafür zusätzlich VLBI-Beobachtungssessions von 2-3 Stationen mit nur einer Stunde Messdauer pro Tag, die sogenannten Intensive-Sessions, ausgewertet und die Ergebnisse in Form einer UT1-Zeitreihe zur Verfügung gestellt. Neben den EOP-Produkten werden Beiträge für das ICRF und das ITRF berechnet. Für das ICRF werden Koordinaten von ca. 4000 Quasaren bestimmt und für das ITRF dreidimensionale Positionen und Geschwindigkeiten von ca. 60 VLBI-Beobachtungsstationen. Zusätzlich zu den Produkten der Referenzsysteme wird ein Produkt für Troposphärenparameter generiert. Alle aufgeführten Produkte sind im IVS-Datenzentrum verfügbar oder auch über die IVS-Webseite (<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/products-data/products.html>) abrufbar.

IVS-Kombinationszentrum

Im IVS-Kombinationszentrum werden die Beiträge, die weltweit in den IVS-Analysezentren erstellt werden, zu einer gemeinsamen Lösung kombiniert und die kombinierten IVS-Produkte daraus abgeleitet. Reguläre globale VLBI-Beobachtungen werden zwei Mal pro Woche durchgeführt und kombiniert. In der Regel nehmen an diesen Beobachtungssessions 8-13 weltweit verteilte Stationen teil. 8-10 Analysezentren erstellen aus den VLBI-Beobachtungen jeweils Ergebnisse, welche

Koordinaten der Stationen, die Positionen der angezielten Quasare sowie Erdorientierungsparameter enthalten, die dann über das IVS-Datenzentrum zum IVS-Kombinationszentrum gelangen, um dort ein kombiniertes Produkt zu errechnen, das anschließend wieder im IVS-Datenzentrum zur Verfügung gestellt wird. Der Vorteil von kombinierten Produkten im Vergleich zu den einzelnen Analyseprodukten liegt in verbesserter Stabilität und Genauigkeit, höherer Ausfallsicherheit und einer gleichwertigen Behandlung der einzelnen IVS-Analyseergebnisse.

Zusätzlich zu den Routineauswertungen ist das IVS-Kombinationszentrum verantwortlich für den IVS-Beitrag zum ITRF (siehe auch Bachmann et al., 2016), der im Abstand von 4-5 Jahren neu berechnet wird. Das BKG hat das IVS-Kombinationszentrum 2008 in Kooperation mit dem Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI-TUM) übernommen und seither die Produktpalette stetig erweitert. Die Ergebnisse werden zudem graphisch aufbereitet und als interaktive Grafiken und zum Download auf den Webseiten des IVS-Kombinationszentrums unter <https://ccivs.bkg.bund.de> bereitgestellt (siehe auch Bachmann et al., 2020).

ILRS-Analysezentrum

Das ILRS-Analysezentrum am BKG wird

seit den 1980er Jahren betrieben und ist Teil der Analysegruppe (»Analysis Standing Committee«, ASC) des ILRS (siehe Pearlman et al., 2002). Seine Aufgabe besteht vor allem darin, täglich SLR-Analysen unter Verwendung neuester SLR-Beobachtungen durchzuführen, d. h. globale Lösungen für Stationspositionen, EOPs sowie Satellitenbahnen zu berechnen und an die beiden Datenzentren CDDIS sowie EDC (TU München, Deutschland) des ILRS zu senden. Zum anderen werden wöchentliche Lösungen zu sporadisch anberaumten Pilotprojekten des ASC beigesteuert, welche gegenwärtig die letzten drei Dekaden abdecken. Über die getätigten Arbeiten wird regelmäßig in den ILRS Annual Reports berichtet (z. B. ILRS 2009-2010 Report).

Die für SLR-Analysen erforderlichen Messdaten werden in einem weltweiten Netz von derzeit über 40 aktiven Beobachtungsstationen getätigt. Jede dieser Stationen misst über einen Teil des sichtbaren Bahnbogens fortlaufend die Distanzen zu ausgewählten Satelliten, deren prominentester Vertreter LAGEOS-1 ist (Bild 5), ein Kugelsatellit rundum mit Retroreflektoren bestückt, dessen Bahnhöhe ca. 5600 km beträgt. Weitere Satelliten, welche zurzeit in die SLR-Analysen des ASC eingehen, sind der zu LAGEOS-1 baugleiche LAGEOS-2 sowie Etalon-1 und Etalon-2, welche im Aufbau den LAGEOS-Satelliten ähnlich sind.

Aufgrund der im Vergleich zu den anderen Beobachtungsverfahren der Weltraumgeodäsie (VLBI, GNSS, DORIS) geringen Störeinflüsse auf den Messprozess sowie die Bahnen der Kugelsatelliten liefert SLR, neben VLBI, einen essentiellen Beitrag zur Bestimmung des Maßstabes. Außerdem sind insbesondere die zwei LAGEOS-Satelliten wegen ihrer niedrigen Umlaufbahn besonders sensitiv für das Massenzentrum der Erde und damit zur Zeit unverzichtbar für die Bestimmung des Ursprungs eines ITRF (siehe König, 2018).

IGS-Analysezentrum CODE

Das BKG ist im Rahmen einer langjährigen Kooperation am IGS-Analysezentrum CODE (»Center for Orbit Determination in Europe«) beteiligt (Dach et al., 2019). Das CODE-Konsortium besteht neben dem BKG aus dem Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB), dem Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München (TUM)

und der Schweizer Landestopografie (swisstopo). Die operationelle tägliche Auswertung der GNSS-Daten eines globalen IGS-Netzes von ca. 300 Stationen erfolgt am AIUB, homogene Re-Prozessierungen der kompletten Daten seit den 1990er Jahren – so zum Beispiel für die Neuberechnung des ITRF – erfolgen schwerpunktmäßig an der TUM. Die operationellen Produkte unterscheiden sich auch im IGS nach ihrer Latenzzeit: es gibt sog. FINAL-Produkte, die erst nach ca. zwei Wochen verfügbar sind, RAPID-Produkte, die in weniger als 24 Stunden verfügbar sind, und ULTRA-RAPID-Produkte, die bereits nach 3 Stunden verfügbar sind. Die wichtigsten Produkte in allen drei Produktschienen sind die Bahnen der GNSS-Satelliten zusammen mit den Erdrotationsparametern (Polbewegung und LOD). Die Bahnen sind in einem terrestrischen Bezugssystem gegeben und werden im sp3c-Format zur Verfügung gestellt. Damit diese Bahnen für Anwendungen der Satelliten-Positionierung verwendet werden können, sind die passenden Erdrotationsparameter erforderlich. Für Echtzeit-nahe Anwendungen werden im Rahmen der ULTRA-RAPID-Produkte auch Prädiktionen der Satellitenbahnen erzeugt.

Außerdem werden die Uhren der Satelliten und der verwendeten Bodenstationen passend zu den Satellitenbahnen als Produkte erzeugt und zur Verfügung gestellt. Da GNSS als Mikrowellen-Verfahren von der Atmosphäre beeinflusst ist, kann man sich dies auch zunutze machen und aus dem dichten Stationsnetz sowohl Laufzeitverzögerungen in der Troposphäre als auch Korrekturen des ionosphärischen Einflusses bestimmen und als Produkt zur Verfügung stellen. Gerade bei den Ionosphären-Produkten hat CODE seit vielen Jahren eine Vorreiterrolle im IGS.

IERS und IERS-Zentralbüro

Die geometrischen IAG-Dienste IDS, IGS, ILRS und IVS leiten aus globalen geodätischen Messungen den erdfesten Bezugsrahmen (ITRF), den raumfesten Bezugsrahmen (ICRF) sowie die Erdorientierungsparameter (EOP) ab, jeweils aber nur mit ihren speziellen Beobachtungsverfahren. Da jedes Verfahren seine spezifischen Stärken und Schwächen hat, ergibt erst die Kombination aller Verfahren hochgenaue Bezugsrahmen (vgl. Bild 12). Diese Kombination ist die Aufgabe des IERS. Er

besteht aus mehreren Produktzentren, die für ITRF, ICRF und EOP verantwortlich sind. Außerdem werden für die Kombination und die Vorhersage von EOP geophysikalische Parameter benötigt, für die ebenfalls ein Produktzentrum zuständig ist. Schließlich stellt der IERS auch Richtlinien auf, die für Messungen und Berechnungen verwendet werden sollen, die IERS Conventions (siehe IERS Conventions, 2010). Ein Vorstand (Directing Board) leitet die Arbeit des gesamten IERS. Das IERS-Zentralbüro koordiniert die Tätigkeit, sammelt sämtliche Produkte des IERS, beantwortet Anfragen von Nutzern, betreibt umfangreiche Internetseiten (www.iers.org) und gibt Berichte und andere Publikationen heraus (siehe IERS Annual Report, 2018). Seit 2001 ist das Zentralbüro im BKG in Frankfurt am Main angesiedelt.

Ein weiteres Resultat der Tätigkeiten des IERS ist die Festlegung von Schaltsekunden, welche die bürgerliche Zeit an die langsamer werdende Erdrotation anpassen. Damit werden in unregelmäßigen Abständen die Uhren de facto für eine Sekunde angehalten, so dass sich die bürgerliche Zeit UTC immer um weniger als eine Sekunde vom Erdorientierungsparameter UT1 unterscheidet.

Ausblick und Zusammenfassung

Das BKG ist seit vielen Jahrzehnten in der Geodäsie aktiv und stellt essenzielle Grundlagen für Anwendungen der Satellitenpositionierung zur Verfügung, die für den Anwender mitunter nicht immer offensichtlich erkennbar sind.

In den letzten Jahrzehnten wurde die geodätische Infrastruktur in Wettzell kontinuierlich modernisiert. Dieser Prozess ist noch nicht abgeschlossen und es werden weitere Investitionen getätigt, um die internationale Spitzenstellung zu festigen. Der Aufbau eines eigenen Korrelationszentrums für VLBI ist von strategischer Bedeutung für das BKG, da dies bisher der einzige Baustein in der Verarbeitungskette, angefangen von der VLBI-Beobachtung bis hin zur Bestimmung der Erdrotation, war, der nicht vom BKG in Eigenleistung abgedeckt wurde. Eine vollständige europäische Verarbeitungskette ist aber auch für Galileo von strategischer Bedeutung, um das europäische Satellitennavigationssystem zuverlässig mit europäisch erzeugten Erdrotationsparametern zu versorgen. Ebenso wichtig ist die Erweiterung des VGOS-Netzes über Europa hinaus, da nur die Basislinien zwischen 6000 und 9000 km die gewünschte

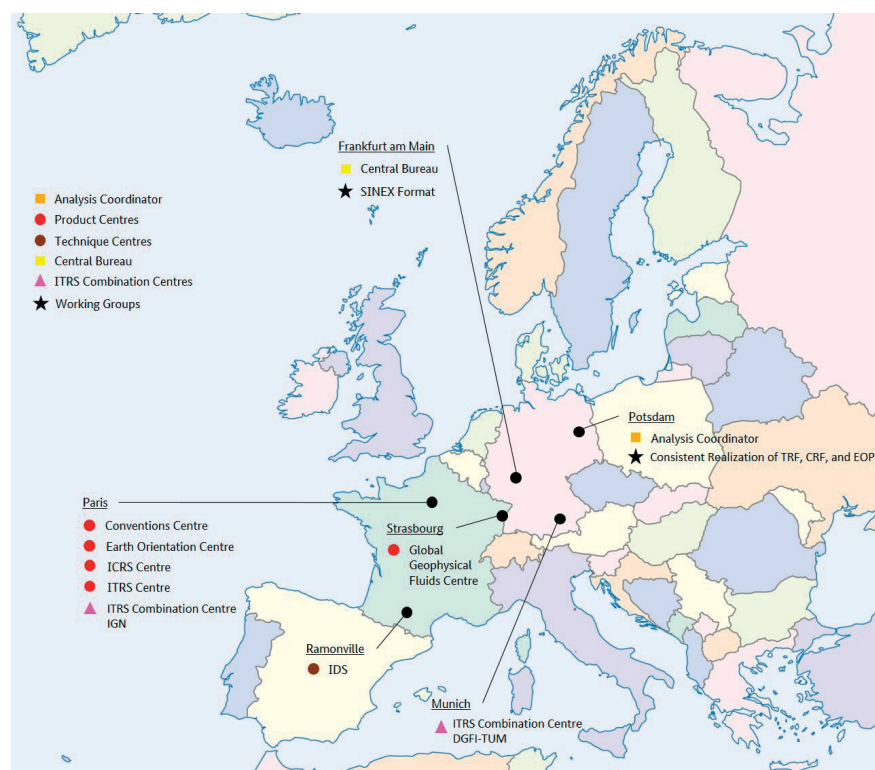


Bild 16: Produktzentren und andere Komponenten des IERS, die in Europa angesiedelt sind. Weitere Komponenten werden in den USA betrieben.

Genauigkeit der Erdrotationsparameter bieten. Hierzu ist der Ausbau der deutsch-argentinischen Fundamentalstation AGGO zu einer GGOS-Station mit VGOS-Radioteleskop vorgesehen. Geodätische Fundamentalstationen sind auf der Südhalbkugel der Erde unterrepräsentiert. Einerseits gibt es dort weniger Landmasse und mehr Ozeane, andererseits ist die wirtschaftliche Lage der dortigen Länder schwieriger. Für die Bestimmung globaler Parameter, wie die der Erdrotation, ist eine möglichst globale Abdeckung mit Fundamentalstationen zwingend erforderlich und das Engagement des BKG maßgeblich und beispielgebend.

Ebenso wichtig wie die geodätische Infrastruktur zur Gewinnung von Beobachtungsdaten sind die darauffolgende Datenanalyse und die zuverlässige Bereitstellung aller Beobachtungsdaten und Analyseprodukte. Hier nimmt das BKG mit dem Betrieb von international anerkannten Daten- und Analysezentren sowie einem Kombinationszentrum eine tragende Rolle ein.

Der Betrieb von Geodätischen Observatorien und Datenanalysezentren in einem globalen Netzwerk ist für jede GNSS-Anwendung von fundamentaler Bedeutung. Gäbe es keine Geodätischen Observatorien, müssten sie jetzt erfunden werden, um den derzeitigen Standard an Lebensqualität hinsichtlich Positionierung oder Navigation halten zu können. Als Teil einer unverzichtbaren globalen Infrastruktur wird das Geodätische Observatorium Wettzell auch als Teil der nationalen kritischen Infrastruktur wahrgenommen.

Es muss aber auch betont werden, dass kein Staat alleine in der Lage ist, alle Voraussetzungen für die bestmögliche Bereitstellung der notwendigen Grundlagen der Satellitenpositionierung zu schaffen. Daher ist eine intensive Kooperation auf internationaler Ebene zwingend erforderlich – globale Geodäsie funktioniert nur mit globaler Zusammenarbeit.

Diese Erkenntnis hat dazu geführt, dass die Generalversammlung der Vereinten Nationen in ihrer Resolution 69/266 ihre Mitgliedsländer dazu aufruft, „ein globales geodätisches Bezugssystem zur nachhaltigen Entwicklung“ bereitzustellen [UN 69/266]. Der deutsche Beitrag zur Erfüllung dieser Resolution wird zu einem maßgeblichen Teil durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit den Geodätischen Observatorien sowie der gezielten Datenana-

lyse und dem Betrieb von Daten-/Produktzentren geleistet.

Literaturverzeichnis:

- Bachmann, S., Bloßfeld, M., Glomsda, M., Thaller, D. (2020): BKG/DGFI-TUM Combination Center Biennial Report 2017+2018. In: *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2017+2018 Biennial Report*, edited by Armstrong, K. L., Baver, K. D. and Behrend, D. NASA/TP-2020-219041, 2020. URL: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/br2017+2018/acbkg-dgfi.pdf>
- Bachmann, S., Thaller, D., Roggenbuck, O., Lösler, M., Messerschmitt, L. (2016): IVS contribution to ITRF2014, *Journal of Geodesy*, Vol. 90, Issue 7, pp. 631–654. DOI 10.1007/s00190-016-0899-4
- Dach, R., Schaer, S., Arnold, D., Prange, L., Sidonov, S., Susnik, A., Stebler, P., Villiger, A. Jäggi, A., Beutler, G., Brockmann, E., Ineichen, D., Lutz, S., Wild, A., Nicodet, M., Dostal, J., Thaller, D., Söhne, W., Bouman, J., Selmeke, I., Hugentobler, U. (2019): Center for Orbit Determination in Europe. In: Villiger, A., Dach, R. (eds.) (2019). *International GNSS Service Technical Report 2018 (IGS Annual Report)*. IGS Central Bureau and University of Bern; Bern Open Publishing. DOI 10.7892/boris.130408
- Engelhardt G., Thorandt, V., Ullrich, D., Girdiuk, A., Halsig, S., Iddink, A., Jaron, F., Karbon, M., Nothnagel, A. (2020): BKG/IGGB VLBI Analysis Center. In: Baver K.D., Behrend D., Armstrong K.L. (Eds.) (2020) *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2017+2018 Biennial Report*, NASA/TP-2020-219041
- Hase, H. (2020): *Geodesy, Networks, and Reference Systems*. In: *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, ed. by Gupta, H. K.: Springer, 2020, DOI 10.1007/978-3-030-10475-7_84-1
- IAG (2019): *IAG Resolutions adopted by the IAG Council at the XXVIIth IUGG General Assembly, Montreal, Canada, July 8-18, 2019*. <https://office.iag-aig.org/doc/5d7b8fd9c6aa0.pdf>
- IERS Annual Report (2018): Edited by Wolfgang R. Thaller, Dick and Daniela. *International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie*, 2020. 207 p., ISBN 978-3-86482-136-3 (print version)
- IERS Conventions (2010): Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). (IERS Technical Note ; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6
- International Laser Ranging Service (ILRS) 2009-2010 Report (2012): Edited by Noll, C. and Pearlman, M. Goddard Space Flight Center, NASA/TP 2013-217507
- IUGG (2019): Resolution 2 “The International Terrestrial Reference Frame (ITRF)”. http://www.iugg.org/resolutions/2019_IUGG_GA_Resolutions.pdf
- Ménoret, V., Vermeulen, P., Le Moigne, N., Bonvalot, S., Bouyer, P., Landragin, A., Desruelle, B. (2018): Gravity measurements below 10–9 g with a transportable absolute quantum gravimeter. *Nature Scientific Reports*, 8:12300, DOI 10.1038/s41598-018-30608-1

König D. (2018): A Terrestrial Reference Frame realized on the observation level using a GPS-LEO satellite constellation, *Journal of Geodesy*, Vol. 92, Issue 11, pp. 1299-1312, DOI 10.1007/s00190-018-1121-7

Pearlman, M.R., Degnan, J.J., and Bosworth, J.M. (2002): „The International Laser Ranging Service“, *Advances in Space Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 135-143. DOI 10.1016/S0273-1177(02)00277-6

UN 69/266: A global geodetic reference frame for sustainable development, <https://undocs.org/en/A/RES/69/266>, 2015

Wziontek, H., Bonvalot, S., Falk, R., Gabalda, G., Mäkinen, J., Pálinkás, V., Rülke, A., Vitushkin, L. (2020): Status of the International Gravity Reference System and Frame. *Journal of Geodesy (in review)*

Redaktion BKG

Für das Autorenteam übernahm die redaktionellen Arbeiten seitens des BKG:



Dominik Opalka

Stabsstelle Strategische Planung,
Öffentlichkeitsarbeit
Bundesamt für Kartographie
und Geodäsie (BKG)
Richard-Strauss-Allee 11
60598 Frankfurt am Main

Tel.: +49 69 6333-249
E-Mail: stabsstelle@bkg.bund.de
www.bkg.bund.de