

Fundamentalstation Wettzell – ein geodätisches Observatorium

Wolfgang Schlüter, Nikolaus Brandl, Reiner Dassing, Hayo Hase, Thomas Klügel, Richard Kilger, Pierre Lauber, Alexander Neidhardt, Christian Plötz, Stefan Riepl und Ulrich Schreiber

Zusammenfassung

Die Fundamentalstation Wettzell ist ein geodätisches Observatorium, auf dem die geodätischen Raumverfahren Very Long Baseline Interferometry (VLBI) und Satellite/Lunar Laser Ranging (SLR/LLR) betrieben werden. Des Weiteren werden globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) durch kontinuierliche Beobachtung der verfügbaren Satelliten für geodätische Aufgaben genutzt. Diese Messsysteme werden durch Sensoren zur Erfassung lokaler Messgrößen (Schwere, Meteorologie, Seismik, Zeit und Frequenz) ergänzt. Dort wurde auch der weltweit einzigartige Ringlaser zur lokalen Erfassung der Erdrotation sowie das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO), das seit 2002 in Concepcion/Chile zum Einsatz gekommen ist, entwickelt.

Zudem werden von der Fundamentalstation Wettzell die Station O'Higgins in der Antarktis betreut und global verteilte GNSS-Stationen im Rahmen von IGS, EUREF oder GREF betrieben. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Aufgaben der Fundamentalstation Wettzell und ihre Einbindung in die internationalen Aktivitäten.

Summary

The Fundamental Station Wettzell is a geodetic observatory, at which geodetic space techniques as Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite/Lunar Laser Ranging (SLR/LLR) and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) techniques are employed. In addition local sensors for gravity, meteorology, and seismology are installed and a time and frequency (T&F) system is implemented. The Transportable Integrated Geodetic Observatory (TIGO) and the unique ringlaser »G« for local monitoring of the Earth rotation were also developed there. Furthermore the responsibilities for the operation of the geodetic components of the O'Higgins Station in Antarctica and numerous permanent installed GNSS stations in the frame of IGS, EUREF and GREF are in hands of the Fundamental Station Wettzell. This report summarizes the tasks of the Fundamental Station and the international activities and relations.

1 Einführung

Messungen zu extragalaktischen Radioquellen mit Radioteleskopen (VLBI: Very Long Baseline Interferometry), Entfernungsmessungen zu künstlichen Erdsatelliten und zum Mond mit Lasersystemen (SLR/LLR: Satellite/Lunar Laser Ranging) sowie die Nutzung von satellitengestützten Navigationssystemen wie GPS haben in den letzten Jahren sowohl neue Bereiche in der Forschung als auch neue Bereiche in der Vermessungspraxis erschlossen. Nicht nur die

verbesserte Methodik und die Genauigkeitssteigerungen standen im Vordergrund, sondern auch der wirtschaftliche Einsatz dieser modernen geodätischen Raumverfahren. In globalen Programmen, wie dem NASA-Crustal

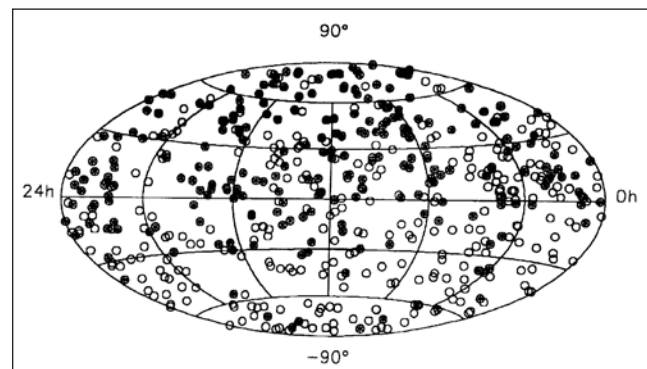


Abb. 1: Verteilung der Quasare, die ICRF festlegen

Dynamics Project (Smith und Turcotte 1993) oder MERIT (Monitor Earth Rotation and Intercompare the Technique, Wilkins 1980), wurden die technischen Voraussetzungen und die interdisziplinäre Zusammenarbeit geschaffen. So steht heute der internationale raumfeste Referenzrahmen ICRF (International Celestial Reference Frame) zur Verfügung. ICRF (Abb. 1) ist ein inertialer Bezugsrahmen, der fundamentale Bedeutung für die Astronomie und für die Geodäsie hat (Ma et al. 1998). Er wird durch extragalaktische Radioquellen (Quasare), die sich mit Hilfe der VLBI als beobachtbare, sehr stabile Punkte im Raum erwiesen haben, festgelegt. Ebenso wurde ein globaler, erdfester, sich mit der Erde drehender Bezugsrahmen festgelegt, der ITRF (International Terrestrial Reference Frame, Altamimi et al. 2002). Er wird durch global auf der Erdoberfläche verteilte Messsysteme materialisiert (Abb. 2), die kontinuierliche Positionsbestimmungen erlauben. Für diese Stationen sind die Raumkoordinaten sowie deren zeitliche Veränderungen infolge der tektonischen Plattenbewegungen erfasst und zu bestimmten Epochen katalogisiert (<http://itrf.ensg.ign.fr/>). Die Drehbewegung der Erde spielt eine Schlüsselrolle, um das raumfeste und das erdfeste System miteinander zu verbinden. Die Bestimmung von Parametern, die die Erdrotation beschreiben, die sogenannten EOPs (Earth Orientation Parameters), spielen daher eine zentrale Rolle. Die Aufgabe der Laufendhaltung globaler Referenzsysteme umfasst eine kontinuierliche Bestimmung all der Parameter, die die raum- und erdfesten Bezugsrahmen (ICRF, ITRF) einschließlich der Erdorientierungsparameter (EOP) festlegen. Dies bedeutet für ICRF, Quasarpositionen durch Rektaszension und

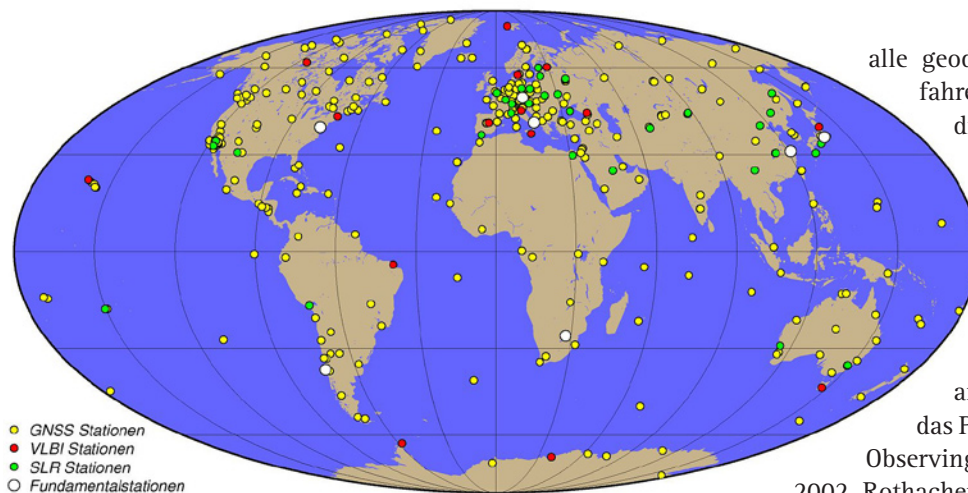


Abb. 2: Weltweite Verteilung der Beobachtungsstationen, die ITRF realisieren

Deklination astrometrisch festzulegen und mögliche Veränderungen in der Lage und der Signalstärke aufzudecken. Für ITRF sind kontinuierlich die Koordinaten (X, Y, Z) der Stationen und deren Geschwindigkeit ($dX/dt, dY/dt$ und dZ/dt) zu beobachten. EOPs beschreiben die Richtung der Rotationsachse im ICRF durch $d\psi$ und $d\epsilon$, im ITRF durch die Polkoordinaten x_p und y_p und die Drehgeschwindigkeit, dargestellt durch UT1-UTC. Dies ist eine komplexe, globale Aufgabe, die nur auf internationaler Ebene erbracht werden kann. In den letzten Jahren haben sich daher im Rahmen der IAG (International Association of Geodesy) internationale Dienste etabliert, die Beobachtungen, Datenfluss, Analyse und technologische Entwicklungen innerhalb der einzelnen Raummessverfahren koordinieren. Zu nennen sind:

- IGS: International GNSS Service (Beutler et al. 1999; Dow 2003),
- ILRS: International Laser Ranging Service (Pearlman et al. 2002),
- IVS: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (Schlüter et al. 2002),
- IDS: International DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) Service (Tavernier et al. 2002) sowie der
- IERS: International Earth Rotation and Reference Frame Service (<http://www.iers.org>).

Der IGS, ILRS, IVS und IDS sind die IAG-Dienste der verschiedenen Raummessverfahren. Der IERS kombiniert die Ergebnisse dieser Dienste zu endgültigen Produkten. Diese Produkte sind die Grundlage für viele Forschungsaufgaben, vor allem in den Bereichen der Geowissenschaften («Global Change») und der Raumfahrt. Besondere Bedeutung haben sie für die Vermessung und für die Navigation.

Mit der Fundamentalstation Wettzell (FS-Wettzell), die vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) gemeinsam mit der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) betrieben wird, hat Deutschland eine führende Rolle auf dem Beobachtungssektor. Konsequenterweise wurden

alle geodätisch relevanten Raummessverfahren eingesetzt und mit den notwendigen in-situ-Messungen ergänzt sowie die messtechnischen Weiterentwicklungen verfolgt.

Die IAG hat insbesondere mit Blick auf die kommenden Anforderungen, die künftige Fragestellungen im Zusammenhang mit globalen Veränderungen an globale Referenzsysteme stellen, das Pilotprojekt GGOS (Global Geodetic Observing System) etabliert (Rummel et al.

2002, Rothacher 2006). Das Ziel von GGOS ist die

Realisierung eines hochgenauen, globalen Referenzsystems, das konsistent über Jahrzehnte erhalten wird und das geometrische und physikalische Größen konsistent und mit vergleichbarer Genauigkeit (10^{-9}) kombiniert.

2 Beitrag der Bundesrepublik Deutschland

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich bereits seit Anfang der 70er Jahre maßgeblich an internationalen Messprogrammen beteiligt. Die Arbeiten wurden bis 1986 innerhalb des Sonderforschungsbereichs 78 Satellitengeodäsie koordiniert (Schneider 1990), aus dem die heutige Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) hervorgegangen ist.

An der FGS beteiligen sich

- das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG),
- die Technische Universität München (TUM) mit dem Institut für Astronomische und physikalische Geodäsie (IAPG) und der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG),
- das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut (DGFI) und
- die Universität Bonn mit dem Institut für Geodäsie und Geoinformation, ehemals Geodätisches Institut (GIUB).

Die FGS unterstützt maßgeblich die internationalen Dienste durch Beobachtungen, Vorhalten von Datenbanken und Analysezentren. Die Fundamentalstation Wettzell, in deren Verantwortung auch das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO) und die German Antarctic Receiving Station O'Higgins (GARS) mit einbezogen sind, leistet international hoch anerkannte Beiträge zur Datengewinnung.

Nur das VLBI-Verfahren erlaubt direkte Messungen zu Quasaren. Es ist daher die primäre Technik, mit der das raumfeste Bezugssystem realisiert wird. Es liefert die zuverlässigsten und genauesten Parameter über die Erdrotation. Laserentfernungsmessungen zu Satelliten sind sensitiv auf das Gravitationsfeld der Erde und sie liefern den Bezug zum Geozentrum. Als optisches Messverfahren wird es auch als ein absolutes Verfahren zur Kalibrier-

rung der Mikrowellentechniken betrachtet. Es bestimmt den Maßstab. Satellitengestützte Navigationssysteme (GNSS) wie GPS, das russische GLONASS oder künftig GALILEO finden eine sehr weite Verbreitung, da die Nutzersegmente vielseitig, genau und kostengünstig sind. GNSS-Methoden ermöglichen den Bezug zum globalen Referenzsystem auf allen Ebenen der Georeferenzierung – von globalen Anwendungen (Plattentektonik, Meeresspiegelveränderungen) über regionale Verdichtungen des ITRF (EUREF (Europa), GREF (Deutschland), SAPOS® (Bundesländer)) bis hin zur Punktbestimmung im Alltag.



Abb. 3: Fundamentalstation Wettzell: im Vordergrund eine GNSS-Antenne, im Hintergrund von links WLRs, RTW und das Gebäude des neuen SOS_W

Jedes Raumverfahren realisiert seinen eigenen, technikspezifischen, globalen Bezugsrahmen. Fundamentalstationen ermöglichen die Kombination der verschiedenen Messtechniken, da dort die geometrischen Beziehungen (Zentrierungen) zwischen den Messsystemen lokal gemessen und bekannt sind. Dadurch können zum Einen die Messergebnisse der unterschiedlichen Techniken verglichen und systematische Abweichungen aufgedeckt werden, zum Anderen können die Vorteile der unterschiedlichen Methoden gemeinsam genutzt werden. Weltweit gibt es derzeit neben Wettzell die folgenden Fundamentalstationen, die über VLBI-, SLR- und GNSS-Systeme verfügen:

- Matera/Italien,
- Greenbelt/USA,
- Shanghai/China,
- Tokio-Umgebung (Keystone)/Japan,
- Hartebeesthoek/Südafrika und
- Concepcion/Chile (TIGO).

3 Von der Satellitenbeobachtungsstation zur Fundamentalstation

Die Anfänge der Fundamentalstation Wettzell reichen zurück in den Herbst 1971 (Nottarp et al. 1973). Flugsicherheitsrelevante Bedenken machten es unmöglich, die Satellitenbeobachtungsstation des damaligen Instituts für Angewandte Geodäsie (IfAG) bei Kloppenheim/Taunus mit einem Laserentfernungsmesssystem auszubauen. In Abstimmung mit den zuständigen Dienststellen wurde ein Gebiet im Bayerischen Wald in der sogenannten ADIZ (Air Defense Identification Zone) ausgewiesen, in dem ein Flugsperrgebiet durchgesetzt werden konnte. Es wurde ein Grundstück ausgewählt, das zunächst gepachtet und für erste Erprobungsvorhaben kostengünstig erschlossen wurde. Im September 1972 wurde zunächst ein Laserentfernungsmesssystem der ersten Generation (Messgenauigkeit: 1 m) installiert, das in einer einfachen Schutzhütte mit einem fahrbaren Dach und einem Holz-

haus untergebracht werden konnte. Bereits im Jahre 1977 wurde das Laserentfernungsmesssystem der ersten Generation durch ein System der dritten Generation (Messgenauigkeit: Zentimeter) abgelöst. In der Zeit von 1980 bis 1983 wurde das 20m-Radioteleskop (RTW) errichtet, durch das sich die Satellitenbeobachtungsstation Wettzell auch nach außen sichtbar vom Provisorium zu einer festen Einrichtung etablierte. Die Arbeiten und insbesondere die Ausbaumaßnahmen zu einer Fundamentalstation wurden bis 1986 im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Satellitengeodäsie (SFB 78) durchgeführt. Seit 1986 wurden im Rahmen der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) weitere Ausbaumaßnahmen getroffen und Projekte durchgeführt. Auf der Fundamentalstation Wettzell (Abb. 3) sind derzeit die folgenden Systeme für die Raummessverfahren im Einsatz:

- das 20m-RTW (20m-Radioteleskop Wettzell), speziell konzipiert für die geodätische Very Long Baseline Interferometry (VLBI), das 1983 operationell fertiggestellt war (Kilger 1990);
- das WLRs (Wettzell Laser Ranging System), das für Entfernungsmessungen zu künstlichen Erdsatelliten (SLR) und zum Mond (LLR) ausgelegt ist. 1990 konnte damit ein routinemäßiger Beobachtungsbetrieb aufgenommen werden (Dassing 1992);
- stationär installierte GNSS-Empfänger (Typ: TURBO-ROGUE ACT, Trimble SSI, ASHTECH, JAVAD und Septentrio). Wettzell ist eine sogenannte »Core-Station« von IGS, EUREF und GREF. Mit der Einrichtung permanenter Stationen wurde Mitte der 90er Jahre begonnen; heute betreut die FSW als »Operations Center« etwa 30 »remote«-kontrollierte, permanent eingerichtete GNSS-Stationen, die im Rahmen des IGS, EUREF-Perm und GREF betrieben werden.

Folgende Systeme, die lokale Messdaten erfassen und bereitstellen, ergänzen das Instrumentarium:

- ein Zeit- und Frequenzsystem, zur Bereitstellung der notwendigen Zeitskalen und Bezugsfrequenzen (Schlüter 1988),

- ein supraleitendes Gravimeter, zur Erfassung örtlicher Schwereänderungen (z. B. als Folge der Erdgezeiten),
- ein Breitbandseismometer, zur Registrierung von Erdbeben (in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe),
- eine Wetterstation mit einem Wasserdampfadiometer, zur Erfassung der meteorologischen Daten (vor allem Luftdruck, Temperatur, Feuchte) zur Korrektur der atmosphärischen Einflüsse.

Zur Bestimmung von Verbindungsvektoren zwischen den einzelnen Messsystemen sowie zur lokalen Lageüberwachung und Stabilitätskontrolle wurden örtliche Lage-, Höhen- und Schwerenetze eingerichtet (Schlüter et al. 2006a, Schlüter et al. 2006b).

Mit Blick auf die unzureichende globale Verteilung von Fundamentalstationen wurde im Verantwortungsbereich der Fundamentalstation Wettzell von 1992 bis 1999 das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO) konzipiert, realisiert und für den Feldeinsatz erprobt. TIGO verfügt über vergleichbare Beobachtungssysteme wie die Fundamentalstation Wettzell. Seit 2002 wird es vom BKG gemeinsam mit einem chilenischen Konsortium unter der Leitung der Universität von Concepcion/Chile sehr erfolgreich betrieben (Hase et al. 2007).

Gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde in den 90er Jahren ein Radioteleskop auf der Antarktischen Halbinsel in O'Higgins eingerichtet (Hase et al. 1994), mit dem kampagnenweise wertvolle VLBI Beobachtungsreihen gemessen werden. Durch die exponierte Lage in der Antarktis ist die Station O'Higgins eine bedeutsame geodätische Messstation.

Eine weltweit einmalige technologische Neuentwicklung war der Bau eines Großringlasers auf der Fundamentalstation (Klügel et al. 2005). Die inertielle Rotationsmessung mit Ringlasern hat sich in der Navigation zur Erfassung von Richtungsänderungen schon lange bewährt und kann bei entsprechend sensibler Auslegung genutzt werden, um Schwankungen der Erdrotation lokal, instantan und kontinuierlich zu messen.

4 Entwicklung der Messsysteme und der derzeitige Stand

4.1 Das 20m-Radioteleskop

In der VLBI werden 5 bis 10 Milliarden Lichtjahre entfernte Radioquellen (Quasare) von mindestens zwei Radioteleskopen gleichzeitig angemessen (Abb. 4). Dabei werden die Mikrowellen empfangen, digitalisiert und zusammen mit der Zeitinformation einer Atomuhr auf Datenträgern aufgezeichnet. Die Daten werden von allen beteiligten Teleskopen zu einem Korrelator geschickt, der durch Korrelation der Signale miteinander die Signallaufzeitunterschiede zwischen den Radioteleskopen er-

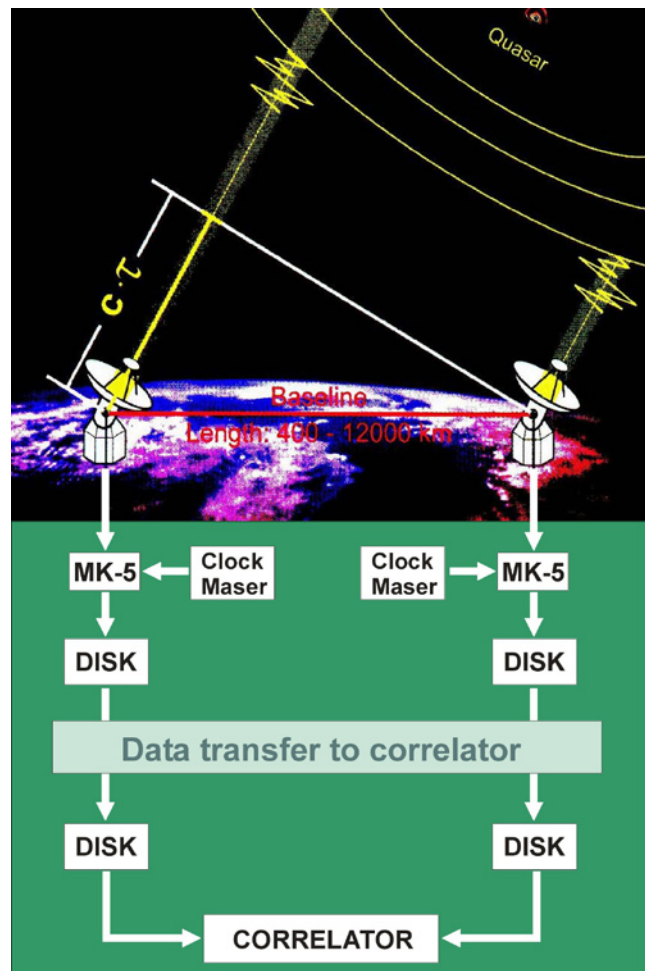


Abb. 4: VLBI-Messprinzip

mittelt. Aus den Laufzeitdifferenzen werden dann, u. a., die Längen der Basislinien und die Erdrotationsparameter abgeleitet.

Das 20m-Radioteleskop der Station Wettzell (RTW) wurde im Jahre 1980 ausschließlich für die geodätische Nutzung der Radiointerferometrie konzipiert (Abb. 5). Besonderer Wert ist dabei auf die eindeutige Definition des Bezugspunktes als Schnitt der Drehachsen (Azimut/Elevation) und auf die Stabilität der Antenne gelegt worden. Unter Berücksichtigung guter Empfangseigenschaften wurde dieses Ziel mit den folgenden Spezifikationen erreicht:

- Antennentyp in Cassegrain-Anordnung mit Hauptreflektor (20 m Durchmesser, Paraboloid, 9 m Brennweite) und Subreflektor (2,7 m Durchmesser, Hyperboloid),
- Frequenzbereich bis zu 25 GHz,
- Alt/Azimut-Montierung, Drehbereich im Azimut: -90° bis $+450^\circ$, in Elevation: 0° bis 90° .

Zur Datenaufzeichnung wurde anfangs das von der NASA entwickelte »Data Acquisition Terminal MK III« eingesetzt, das die Aufzeichnung großer Datenmengen ($\sim 1-2$ Tera-byte pro Tag) auf spezielle Magnetbänder erlaubte. Heute wird das auf Festplatten basierende MK V-System genutzt. Das System erlaubt es, neben der Speicherung



Abb. 5: 20m-Radioteleskop Wettzell

einer großen Datenmenge (~4 Terabyte), die Daten mit einer sehr schnellen Aufzeichnungsrate bis zu 2 Gigabit pro Sekunde zu registrieren. Es ist zudem internetfähig und ermöglicht, die großen Datenmengen über schnelle Internet-Anbindungen an einen Korrelator zur Weiterverarbeitung zu leiten. Als Empfänger dient ein ebenfalls von der NASA entwickelter, mit Helium auf 20 Kelvin gekühlter S/X-

Band-Empfänger. Die Zeitinformation für die Messungen wird von Atomuhren des Zeitsystems geliefert. Wasserstoffmaser, die sich durch besonders hohe Kurzzeitstabilität ($\sim 10^{-15}$) auszeichnen, stehen dafür zur Verfügung. Im Allgemeinen werden die auf einer Beobachtungsstation aufgezeichneten VLBI-Daten per Kurier zum Korrelator transportiert, wodurch zwangsläufig die Prozessierung am Korrelator um einige Tage verzögert wird. Die heute verfügbaren schnellen Internetleitungen, mit Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 10 Gbps, ermöglichen jedoch die Bereitstellung der Daten am Korrelator in naher Echtzeit. Dies führt zu einer schnelleren Bereitstellung der Ergebnisse. Die Fundamentalstation Wettzell verfügt über einen breitbandigen Internetzugang. Daten zeitkritischer Messserien werden daher über Internet zu den Korrelatoren geschickt. Korrelatoren für geodätische VLBI stehen beim U. S. Naval Observatorium in Washington/USA, beim Haystack Observatorium in der Nähe von Boston/USA, beim Max Planck Institut für Radioastronomie in Bonn/Deutschland (MPIfR) und beim Geographical Survey Institute in Tsukuba/Japan (GSI) zur Verfügung. Der Korrelator in Bonn wird als Gemeinschaftsvorhaben des BKG, des MPIfR und des Instituts für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn (GIUB) betrieben. 30 bis 40 Prozent der geodätischen VLBI-Messserien des IVS werden dort korreliert.

Nach einer Bauphase von zwei Jahren und Testmessungen im Jahre 1983 konnte der operationelle Messbetrieb im Januar 1984 aufgenommen werden. Die hohe technische Zuverlässigkeit und die stete Einsatzbereitschaft führten dazu, dass das Radioteleskop Wettzell nahezu in alle geodätischen VLBI-Messserien einbezogen wird, die zur Bestimmung des ICRF, des ITRF, der EOPs und der Plattenbewegung dienen. An drei bis vier Tagen pro Woche werden in Wettzell durchschnittlich 24h-Beobachtungsserien gemessen. Hinzu kommen täglich Messserien von einer Stunde, die speziell die Drehgeschwindigkeit der Erde (UT1-UTC) erfassen. Diese Ergebnisse werden für die »Orientierung« der GPS-Satelliten möglichst echtzeitnah benötigt. Exemplarisch für VLBI-Ergebnisse ist in Abb. 6 die Änderung der Basislinie zwi-

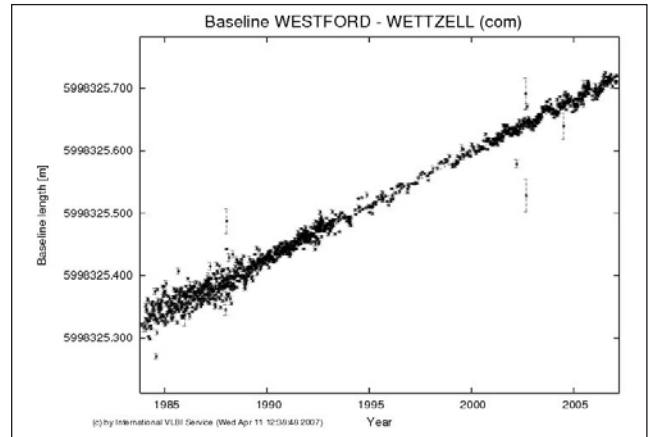


Abb. 6: Zeitliche Veränderung der Basislinie Wettzell – Westford/USA (5998 km)

schen den Stationen Wettzell und Westford bei Boston (USA) (ca. 6000 km) dargestellt. Die Veränderung der Länge der Basislinie zwischen Wettzell und Westford belegt die Kontinentaldrift zwischen Europa und Nordamerika. Der Beitrag Deutschlands zu VLBI ist in Nothnagel (2004) detailliert beschrieben.

4.2 Laserentfernungsmesssysteme

Mit der Entwicklung von leistungsstarken Pulslasern in den 60er Jahren waren die technischen Voraussetzungen für ein Messsystem geschaffen, mit dem Entfernungen zu den sich schnell bewegenden Satelliten gemessen werden konnten. Ein optisches Teleskop wird einem Satelliten, der mit Reflektoren ausgerüstet ist, nachgeführt und sendet die Laserpulse aus. Die Pulse werden reflektiert und wieder empfangen (Radarprinzip, jedoch mit optischen Signalen). Aus der Laufzeit des Signals kann auf die Entfernung geschlossen werden (Abb. 7).

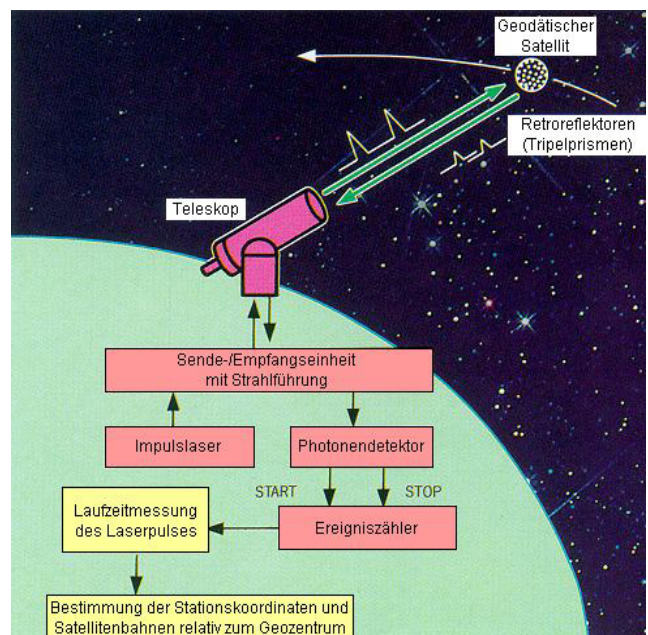


Abb. 7: Messprinzip SLR

Das Institut für Angewandte Geodäsie, aus dem das heutige BKG hervorgegangen ist, erkannte die Bedeutung dieser Entwicklung für die Geodäsie und richtete die Satellitenbeobachtungsstation Wettzell mit dem Ziel ein, dort ein SLR-System der ersten Generation zu erproben. Mit diesem System, das eine Genauigkeit im Meterbereich aufwies, wurden wesentliche Erfahrungen gesammelt, so dass bereits Mitte der 70er Jahre ein System der dritten Generation, das schon auf wenige Zentimeter genau messen konnte, erfolgreich eingerichtet wurde. Das heute eingesetzte WLRs (Wettzell Laser Ranging System) wurde 1986 in Auftrag gegeben und 1990 in Betrieb genommen. Es ist konzipiert worden, um Entfernungen sowohl zu geodätischen Satelliten mit Genauigkeiten im Bereich von Zentimetern am Tage und in der Nacht als auch zum Mond zu messen. Die technischen Spezifikationen lassen sich wie folgt skizzieren:

- optisches 75cm-Teleskop auf einer Alt/Az-Montierung (Abb. 8) zum Senden der Laserpulse und zum Empfangen der am Satelliten reflektierten Pulse;
- ND:YAG-Laser mit drei Verstärkerstufen – Infrarot (1064nm) und Grün (532nm) – zur Generierung der Laserpulse im 10Hz-Takt, mit einer Pulsleistung von etwa 180mJ;
- Detektionssystem mit verschiedenen Empfängern (Mikrokanal-Photomultiplier mit 30ps Jitter und Mehrphotonenauflösung, hochempfindliche Avalanche Photo Dioden auch für den Infrarotbereich, Streakkamera) zur Erfassung der reflektierten Pulse;
- Mehrkanal Eventtimer (ET) mit 2ps Messgenauigkeit zur Erfassung der Pulslaufzeiten.



Abb. 8:
WLRs 75cm-Teleskop

Seit Mitte 1991 wird das System in drei Schichten, 24 Stunden pro Tag an 365 Tagen im Jahr betrieben. Beobachtet werden geodätische Satelliten wie LAGEOS 1 und 2 (~6.000km Flughöhe), Starlette und Stella (~1.000km Flughöhe), ETALON 1 und 2 (~20.000km Flughöhe), AJISAI und Satelliten der Schwerefeldmissionen. Des Weiteren werden Entfernungen zu den Fernerkundungssatelliten und zu den Navigationssatelliten GPS und GLONASS, sofern sie mit Reflektoren ausgestattet sind, gemessen. Künftig werden auch die Satelliten des europäischen Systems GALILEO mit einbezogen, wobei der erste Testsatellit GIOVE-A bereits beobachtet wird.

Die zunehmende Zahl der anzumessenden Satelliten gab Anlass zur Konzeption und zum Bau eines neuen Laserentfernungsmesssystems. Die mit WLRs vorgesehene Kombination von Mondentfernungsmessungen

und Satellitenbeobachtungen hat sich aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen nicht bewährt, weshalb Mondentfernungsmessungen bisher nicht im Routineprogramm aufgenommen sind. Das neue System, mit der Bezeichnung Satellite Observing System Wettzell (SOS_W), ist daher nur für Satellitenmessungen ausgelegt (Riepl et al. 2004). Der Messvorgang soll automatisch ablaufen. Die Laserpulsfrequenz wird auf 1kHz gesteigert. Simultane Messungen sind auf zwei Frequenzen (Infrarot und Blau) zur Erfassung meteorologischer Einflüsse vorgesehen. SOS_W soll Mitte 2008 messbereit sein. Es ist geplant, WLRs für hochfliegende Satelliten (GALILEO)



Abb. 9: Betriebshaus des neuen Lasermesssystems SOS_W

und für die Entfernungsmessung zum Mond zu optimieren, sobald SOS_W operationell ist. Abb. 9 zeigt das fertiggestellte Betriebshaus für SOS_W.

4.3 Permanente GNSS-Stationen

Ortsfest betriebene GNSS-Empfänger erlauben Positionsbestimmungen im mm-Bereich. Die Nutzung von GNSS-Beobachtungen insbesondere zur Vermessung von ausgedehnten Netzen setzt die Kenntnis genauer Satellitenephemeriden voraus. Sogenannte »Precise Ephemerides« wurden für GPS-Satelliten anfangs der 80er Jahre allein von der U. S. Defense Mapping Agency in Washington berechnet und für zivile Anwendungen nur unter Vorbehalt zur Verfügung gestellt. Ein erster Schritt, genaue Bahndaten für zivile Anwendungen vorzuhalten, wurde Mitte der 80er Jahre vom amerikanischen National Geodetic Survey (NGS) eingeleitet. NGS betrieb seinerzeit auf den US-VLBI-Stationen in Richmond, Ft. Davis und Westford stationär installierte GPS-Empfänger. Ab November 1987 beteiligte sich die FS-Wettzell an diesem Vorhaben. Es wurde ein TI 4100 GPS-Empfänger installiert, der – über einen externen PC gesteuert – vollautomatisch alle Satellitendurchgänge aufzeichnete. Über Telefonmodem wurden die Daten täglich vom NGS abgerufen. Im Mai 1989 wurde dieser Empfänger durch einen MINIMAC 2816 AT ersetzt. Bedingt durch den Start weiterer GPS-Satelliten war bald der Einsatz eines Empfängers mit mindestens

acht Kanälen erforderlich. Seit Juli 1991 wurde daher ein ROGUE SNR 800 Empfänger eingesetzt. Die Messdaten wurden über INTERNET bereitgestellt. Anfang der 90er Jahre wurde dieses GPS-Netz durch eine breite internationale Beteiligung auf etwa 25 global verteilte Stationen erweitert. Dieses Netz wurde als CIGNET (Cooperative International GPS Network) bekannt. Heute ist CIGNET in den »International GNSS Service (IGS)« integriert. Das IGS-Netz umfasst mehr als 350 global verteilte Stationen. Davon werden etwa 100 Stationen als sogenannte »core stations« betrachtet, deren Daten für die echtzeitnahe Berechnung hochpräziser Bahndaten genutzt werden. Des Weiteren werden Satellitenpositionen, Stationskoordinaten und Parameter zur troposphärischen und ionosphärischen Refraktion mit hoher Genauigkeit abgeleitet. Diese Produkte stehen bereits nach wenigen Stunden regelmäßig zur Verfügung.

Für die globalen, europäischen und nationalen Anforderungen stehen aus Redundanzgründen in Wettzell GPS-Beobachtungen mit TURBO ROGUE-, ASHTECH-, TRIMBLE-, JAVAD- und Septentrio-Empfängern zur Verfügung. Wettzell kommt hierbei die wichtige Rolle einer Core-Station zu. Um die globale Netzverteilung zu verbessern, was entscheidenden Einfluss auf die Güte der Produkte hat, wurden gemeinsam mit Partnerinstitutionen in den Gastländern weitere permanente GPS-Stationen eingerichtet (Abb. 10). Stationen in Lhasa/Tibet, O'Higgins/Antarktis, Reykjavik und Höfn in Island sowie Concepcion/Chile werden von der FS-Wettzell aus per »remote control« überwacht. Im Bereich von Europa wurde ein regionales Netz (EUREF-perm) aufgebaut. Acht Stationen davon werden von der FS-Wettzell betreut. Im

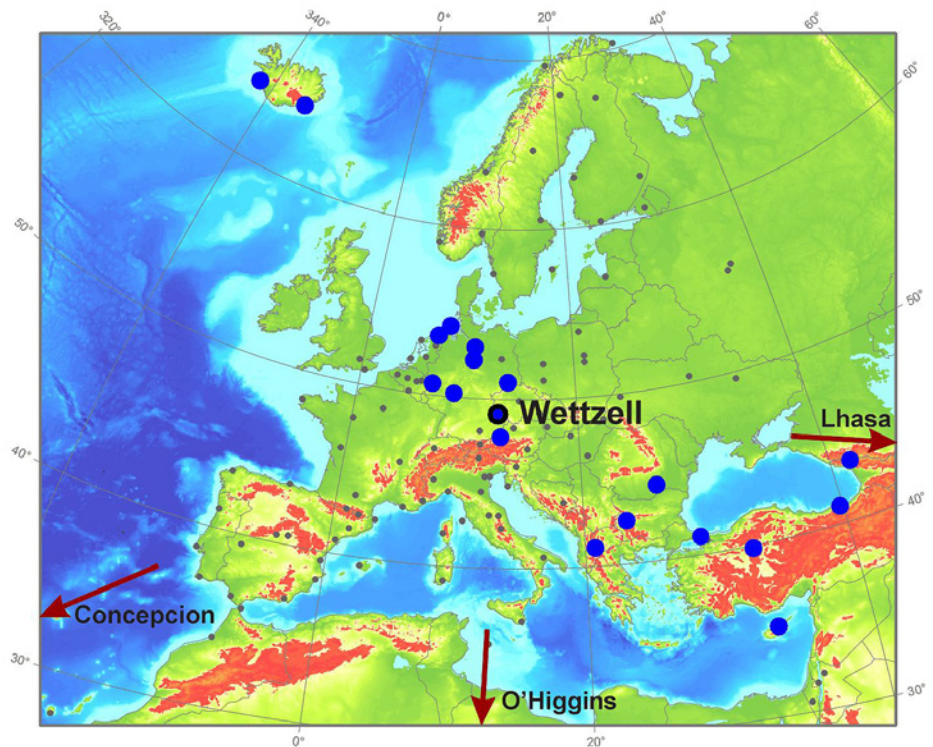


Abb. 10: GNSS-Stationen, die von der FS-Wettzell »remote« überwacht werden

Rahmen von IGS und EUREF hat die Fundamentalstation Wettzell die Funktion eines »Operation Centers« (Abb. 11a und 11b).

Das BKG hat ein Netz auf dem Gebiet der Bundesrepublik mit über 20 Stationen (GREF) eingerichtet, die Daten werden in Echtzeit zu einer Zentrale nach Frankfurt/Main übertragen (Dettmering und Weber 2003; Dettmering 2006).

Ziel permanenter Messungen ist es, Zeitreihen der aktuellen ITRF-Koordinaten für die Referenzstationen abzuleiten, um Positionsveränderungen zu bestimmen. Die Messungen werden auch für troposphärische Untersuchungen, insbesondere zur Bestimmung des Feuchtegehalts der Atmosphäre genutzt.

4.4 Zeit und Frequenz

Genau und zuverlässige Zeitangaben sowie die Verfügbarkeit hochgenauer Bezugsfrequenzen sind für die geodätischen Raumverfahren unabdingbar. Bezugsepochen müssen sowohl für Laserentfernungsmessungen als auch für VLBI-Beobachtungen genauer als 50 ns sein. Die Referenzfrequenzen müssen hochwertige Kurzzeit- und Langzeiteigenschaften aufweisen. Um den Anforderungen aller Messverfahren gerecht zu werden, ist ein komplexes Zeit- und Frequenzsystem erforderlich (Abb. 12 und 13). Das Zeitsystem der Station Wettzell basiert auf

- fünf Cäsiumfrequenznormalen mit Zeitgeneratoren (Cäsium-Atomuhren), die die lokale Zeitskala UTC (Wettzell) generieren;
- drei Wasserstoffmasern, die sehr stabile Frequenzen für VLBI- und GPS-Messungen zur Verfügung stellen;



Abb. 11a: GPS-Operationszentrum Wettzell, Rack mit Steuerrechner und GPS-Systemen



Abb. 11b: GPS-Operationszentrum Wettzell, Blick in den Messraum

- zwei GPS-Zeitempfängern, mit denen die lokale Zeitskala an international verfügbare Zeitskalen (UTC (BIPM), UTC (USNO)) durch Zeitvergleich über GPS angebunden wird.

Die Cäsium-Atomuhren und Wasserstoffmaser sind an der Generierung der UTC-Zeitskala durch das BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) beteiligt, die rechnerisch als »Mittel« sämtlicher verfügbarer Atomuhren (mehr als 300) bestimmt wird. Die Ablagen der Zeitskala UTC (Wettzell) gegenüber UTC werden im Circular T des BIPM (BIPM 2006) monatlich veröffentlicht.



Abb. 12: Zeitmessplatz



Abb. 13: Wasserstoffmaser, ein hochgenauer Frequenz-generator

4.5 Ortsbezogene Messungen

Zusätzlich zu den Satelliten- und VLBI-Beobachtungen werden terrestrische, geodätische Messungen durchgeführt, um lokal bedingte Einflüsse zu erfassen und zu berücksichtigen. Es werden

- meteorologische Daten, wie Luftdruck, Temperatur und Wasserdampfgehalt für die Berechnung der Refraktionskorrekturen bestimmt,
- kontinuierliche Schweremessungen mit einem supraleitenden Gravimeter durchgeführt, um Schwerevariationen zu erfassen,
- seismologische Beobachtungen in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe durchgeführt, um Erdbeben aufzuzeichnen. Diese Daten werden im deutschen und im internationalen seismischen Verbundnetz genutzt und ausgewertet,
- terrestrische Lage- und Höhenmessungen ausgeführt, um einerseits Verbindungsvektoren zwischen den Messsystemen und den vermarkten Referenzpunkten zu bestimmen und um andererseits örtliche Lageveränderungen festzustellen.

Auf der Station und in der Umgebung sind Lage-, Höhen- und Schwerenetze eingerichtet worden, die in regelmäßigen Abständen neu vermessen werden.

5 Die Beobachtungsstation GARS O'Higgins

Auf der Nordspitze der Antarktischen Halbinsel betreibt das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) gemeinsam mit dem BKG die German Antarctic Receiving Station (GARS) O'Higgins. Hauptsystem ist ein 9m-Radioteleskop (Abb. 14), das vom BKG für VLBI und von der DLR zur Erfassung der Daten von Erderkundungssatelliten genutzt wird. Auf der Station werden auch zwei GPS/GLONASS-Empfänger und eine Pegelstation betrieben. Seit 1991 wird die Station jährlich im antarktischen Frühjahr und Sommer in Betrieb genommen. Dabei wer-



Abb. 14: Die Beobachtungsstation O'Higgins

den jeweils vier bis sechs VLBI-Kampagnen durchgeführt und die notwendigen Wartungs- und Erhaltungsmaßnahmen getroffen.

6 Laserkreisel zur Erfassung von Variationen der Erdrotation

Während VLBI-Stationen durch die Beobachtung astronomischer Objekte ihren Bezug aus dem starren älestitischen Bezugsrahmen gewinnen, beschritt die Fundamentalstation Wettzell mit dem Bau eines großen Ringlaser-Gyroskops als Inertialsensor einen neuen Weg. Das Funktionsprinzip beruht auf dem »Sagnac-Effekt«, wobei sich bei zwei kohärenten Lichtstrahlen, die in entgegengesetzter Richtung ein Flächenstück umlaufen, dann eine Phasendifferenz einstellt, wenn die Apparatur einer Rotationsbewegung unterworfen ist. Diese messbare Phasendifferenz ist strikt proportional zur Winkelgeschwindigkeit und von daher als Messgröße zur Bestimmung der Variationen der Drehrate der Erde bzw. für die Bestimmung der Richtungsänderung der instantanen Rotationsachse der Erde sehr gut geeignet. Ist der Strahlengang Teil eines optischen Laserresonators, so äußert sich der Phasenunterschied der beiden gegensinnig umlaufenden Strahlen als Frequenzdifferenz, die den Vorteil hat, dass sie genauer mit dem erforderlichen Auflösungsvermögen 10^{-9} der Erddrehrate bestimmt werden kann. Ein Laserkreisel ist auf der sich drehenden Erde somit ein lokaler Erdrota-

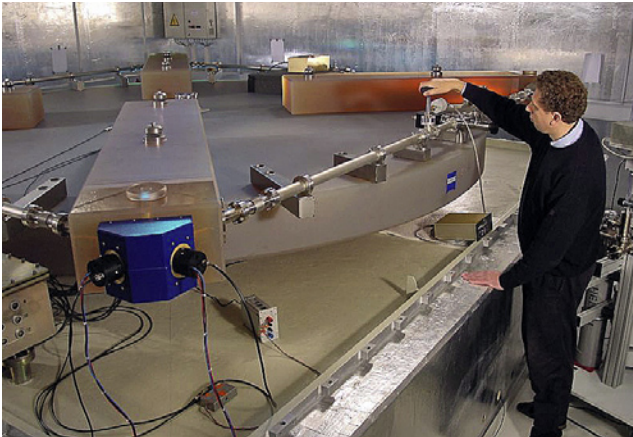


Abb. 15: Großringlaser »G«

tionsensor, der weder auf zu beobachtende Objekte noch auf globale Beobachtungsnetze angewiesen ist. Der Vorteil eines Laserkreisels zur Erfassung der Erdrotation wird in der zeitlich höheren Auflösung gegenüber den bisher eingesetzten Raumverfahren sowie in dem komplementären Messprinzip gesehen. Die Ergebnisse können lokal beobachtet und echtzeitnah bereitgestellt werden.

Mit dem Bau des Großringlasers »G« (Abb. 15) wurde im Jahr 1999 auf der Fundamentalstation Wettzell begonnen. Ziel ist es, eine Gesamtempfindlichkeit von $10^{-9} \Omega_{\oplus}$ (Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation) bei einer Zeit-

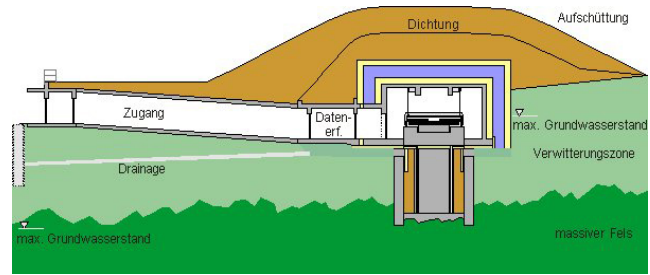
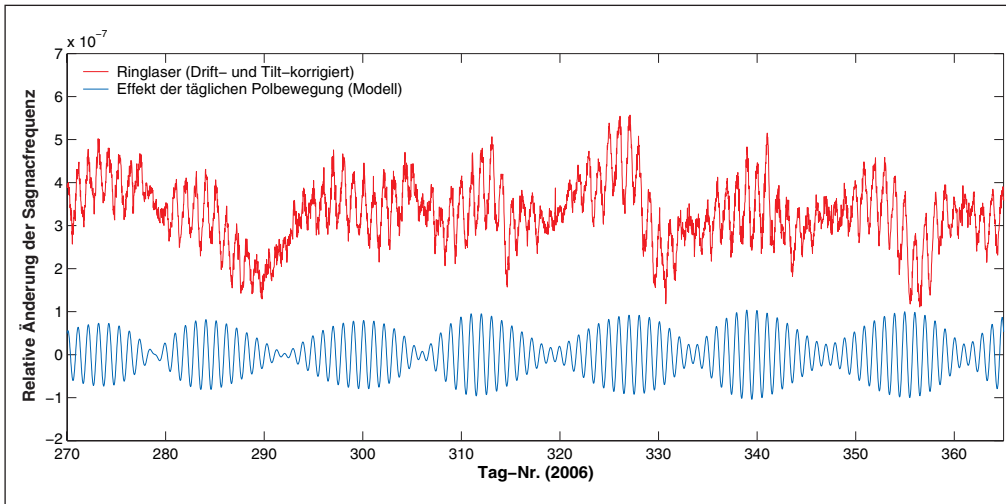
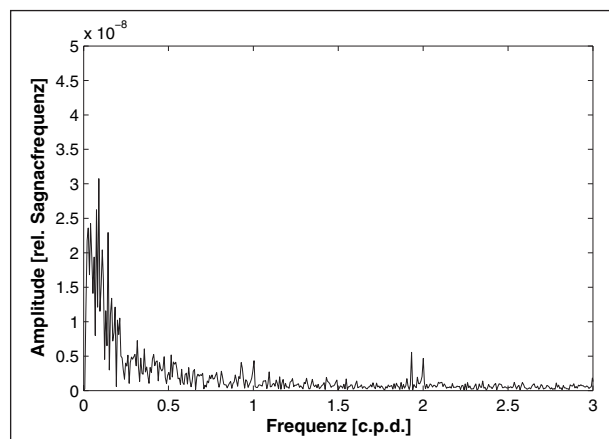
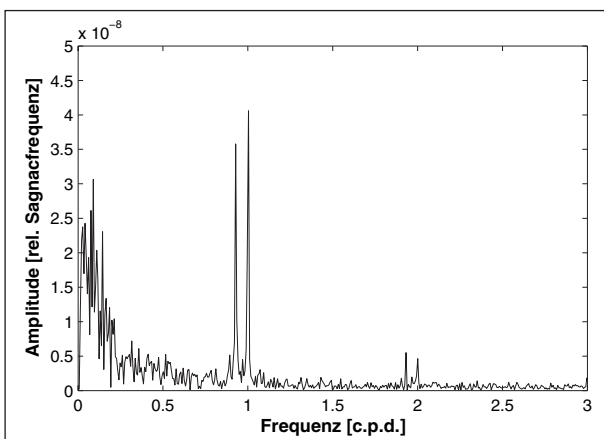


Abb. 16: Schema des Tiefenlabors

auflösung von ein bis zwei Stunden zu erreichen. Der Ringlaser, der eine Fläche von $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ umspannt, ist in einem unterirdischen Labor (Abb. 16) untergebracht. Nur dadurch können die erforderliche hohe Temperaturkonstanz sichergestellt und die bestmögliche Abschirmung von Rotationsanteile erzeugenden Umgebungseinflüssen erreicht werden. Nach einer Bauzeit von etwa drei Jahren wurde Ende 2001 mit dem Messbetrieb begonnen. Mit einer Auflösung von 10^{-8} der Erdrotation Ω_{\oplus} ist »G« der weltweit genaueste Rotationssensor. Es konnten erstmals die täglichen Polbewegungen (Abb. 17a–c) direkt gemessen und die größten Komponenten geschätzt werden (Schreiber et al. 2005, Klügel et al. 2005b), die bisher nur theoretisch vorausgesagt bzw. modelliert wurden. Bau und Funktionsweise des Großringlasers ist in Klügel et al. (2005a) ausführlich beschrieben.



◀ Abb. 17a: Zeitreihe des Großringlasers über 95 Tage (rot) in Gegenüberstellung mit einer Modellreihe der täglichen Polbewegung (blau)
 ▶ Abb. 17b: Amplitudenspektrum der Zeitreihe
 ▼ Abb. 17c: Amplitudenspektrum nach Abzug der Modellreihe. Die spektralen Anteile um 2 c. p. d. (cycles per day) resultieren aus einer unvollständigen Neigungskorrektur.



7 Ausblick

Zu einer Fundamentalstation gehört es, dass sie immer auf dem aktuellsten Stand der technologischen Entwicklung gehalten wird. In den zurückliegenden Jahren wurden ständig veraltete Geräte durch neuere ersetzt, um mit der technischen Entwicklung Schritt halten zu können. Dies wurde und wird durch die Betreiberinstitutionen, das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie sowie die Technische Universität München, möglich gemacht.

Die Fundamentalstation Wettzell gilt als die Musterstation für die globale Erdvermessung schlechthin. Die Wettzeller Erfahrungen mit der Kollokation von komplementären Instrumenten und Methoden im Dauerbetrieb haben zahlreiche Impulse für wissenschaftliche Studien gegeben. Diese Erfahrungen haben ihren Widerhall in der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) gefunden. Die IAG möchte mit ihrem einzigen Projekt der Einrichtung eines Global Geodetic Observing System (GGOS) zum Global Earth Observing System of Systems (GEOSS) der Group on Earth Observation (GEO, 67 Länder, 45 internationale Institutionen) einen geodätischen Beitrag leisten. Die angedachten Ziele werden ohne Fundamentalstationen nicht erreicht werden können.

Deshalb wird in den kommenden Jahren die Vorreiterrolle der Fundamentalstation Wettzell für die globale Erdvermessung an Bedeutung zunehmen. Die Idee der Fundamentalstation findet bereits Nachahmung in neuen Projekten in Korea und China. Mit dem Aufbau von GGOS werden weitere Fundamentalstationen in der Welt hinzukommen.

Literatur

- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C.: ITRF2000, A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 107 (B10), 2214, 2002.
- Beutler, G., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T.A., Kouba, J., Neilan, R.E.: The International GPS Service (IGS), An interdisciplinary service in support of Earth Sciences, *Advances in Space Research*, 23 (4), p. 631–653, 1999.
- BIPM, Circular T, Bureau International de Poids et Mesures, Paris 2007.
- Dassing, R., Schlüter, W., Schreiber, U.: Das neue Laserentfernungsmesssystem der Fundamentalstation Wettzell, *ZfV*, Heft 4, 1992.
- Dettmering, D., Weber, G.: DGPS-Dienste des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG), Tagungsband des POSNAV 2003, DGON Symposium, Dresden, 18.–19. März 2003, Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V., Technische Universität Dresden, Schriftenreihe des Geodätischen Instituts 3, Dresden, 2003.
- Dettmering, D.: Differentielles GPS in Deutschland – Anbieter, Kommunikationswege, Genauigkeiten. In: *GPS und Galileo: Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen*, Beiträge zum 66. DVW-Seminar in Darmstadt, 21./22.02.2006, Schriftenreihe des DVW Band 49/2006, Wißner-Verlag, Augsburg, 2006.
- Dow, J.M.: IGS, The International GPS Service for leading-edge space missions, *ESA Bulletin*, 116, p. 64–69, 2003.
- Hase, H., Nottarp, K., Reinhold, A.: Die Antarktische ERS/VLBI-Station O'Higgins, *AVN*, Heft 4/94, 1994.
- Hase, H., Böer, A., Sierk, B., Riepl, S., Schlüter, W.: Das Geodätische Observatorium TIGO in Concepcion, Chile, *zfv*, in Vorbereitung 2007.
- Kilger, R.: Das 20m-Radioteleskop. In: Schneider, M. (Hg.): *Satellitengeodäsie, Ergebnisse aus dem gleichnamigen Sonderforschungsbereich der Technischen Universität München*, VCH-Verlag, Weinheim, 1990.

- Klügel, T., Schlüter, W., Schreiber, U., Schneider, M.: Großringlaser zur kontinuierlichen Beobachtung der Erdrotation, *zfv*, Heft 2/2005.
- Klügel, T., Schreiber, U., Schlüter, W., Velikoseltsev, A., Rothacher, M.: Estimation of diurnal polar motion terms using ring laser data, *Proc. Journées 2005, Systèmes de Référence Spatio-Temporels*, 19–21, 2005, p. 279–284, Warsaw 2005.
- Ma, C., Arias, F., Eubanks, T.M., Fey, A.L., Gontier, A.M., Jacobs, C.S., Sovers, O.J., Archinal, B.A., Charlot, P.: The International Celestial Reference Frame as realized by Very Long Baseline Interferometry, *Astronomical Journal*, 116 (1), p. 516–546, 1998.
- Nothnagel, A., Schlüter, W., Seeger, H.: Die geodätische VLBI in Deutschland, *zfv* 129, S. 219–226, 2004.
- Nottarp, K., Seeger, H., Wilson, P.: In der Bundesrepublik Deutschland entwickelte Projekte zur Entfernung- und Richtungsmessung nach Satelliten mit Hilfe von Lasern, *Veröff. der Bayer. Kommiss. f. d. Intern. Erdmessung, Astron.-Geod. Arbeiten*, Heft Nr. 30, München, 1973.
- Pearlman, M.R., Degnan, J.J., Bosworth, J.M.: The International Laser Ranging Service, *Advances in Space Research*, 30 (2), p. 135–143, 2002.
- Riepl, S., Schlüter, W., Dassing, R., Brandl, N., Haufe, K.H., Lauber, P., Neidhardt, A.: The S0S-W – A Two Colour Kilohertz SLR System, *Proceedings of the 14th International Workshop on Laser Ranging*, San Fernando, Spain, 7–11 June 2004.
- Rothacher, M.: GGOS: the IAG contribution to Earth observation, *IGS Workshop 2006 »Perspectives and Visions for 2010 and beyond«*, May 8–12, Darmstadt, Germany, 2006.
- Rummel, R., Drewes, H., Beutler, G.: Integrated Global Observing System IGGOS, A candidate IAG Project. In: *Proc. International Association of Geodesy*, Vol. 125, p. 135–143, 2002.
- Schlüter, W.: Zeit und Frequenz in Messverfahren der Geodäsie, *DGK, Reihe C*, Heft Nr. 337, 1988.
- Schlüter, W., Himwich, E., Nothnagel, A., Vandenberg, N., Whitney, A.: IVS and its important role in the maintenance of the global reference systems, *Advances in Space Research*, 30 (2), p. 145–150, 2002.
- Schneider, M. (Hg.): *Satellitengeodäsie, Ergebnisse aus dem gleichnamigen Sonderforschungsbereich der Technischen Universität München*, VCH-Verlag, Weinheim, 1990.
- Schreiber, K.U., Klügel, T., Stedman, G.E.: Earth tide and tilt detection by a ring laser gyroscope, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B2, 2132, 2003.
- Schreiber, K.U., Velikoseltsev, A., Rothacher, M., Kluegel, T., Stedman, G.E., Wiltshire, D.L.: Direct measurement of diurnal polar motion by ring laser gyroscopes, *J. Geophys. Res.* Vol. 109 No. B6, 10.1029/2003JB002803, B06405, 2005.
- Smith, D.E., Turcotta, D.L. (eds.): *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics, Crustal Dynamics Project (U.S.)*, ISBN 0-87590-526-9, American Geophysical Union, Washington DC, 1993.
- Tavernier, G., Soudarin, L., Larson, K., Noll, C., Ries, J., Willis, P.: Current status of the DORIS Pilot Experiment and the future International DORIS Service, *Advances in Space Research*, 30 (2), p. 151–156, 2002.
- Wilkins, G.A.: *Projekt MERIT, Royal Greenwich Observatory and Institut für Angewandte Geodäsie*, Frankfurt, 1980.

Anschriften der Autoren

Dr.-Ing. Wolfgang Schlüter | Dipl.-Ing. (FH) Nikolaus Brandl
 Dr. rer. nat. Reiner Dassing | Dr.-Ing. Hayo Hase
 Dr. rer. nat. Thomas Klügel | Dipl.-Ing. (FH) Christian Plötz
 Dr. rer. nat. Stefan Riepl
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 Fundamentalstation Wettzell
 93444 Bad Kötzing
 wolfgang.schlueter@bkg.bund.de | Tel.: 09941 603-0

Dipl.-Ing. Richard Kilger | Dr.-Ing. Pierre Lauber
 Dr. rer. nat. Alexander Neidhardt | apl. Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Schreiber
 Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der TU München
 Fundamentalstation Wettzell
 93444 Bad Kötzing