

Fundamentalstation Wettzell, ein geodätisches Observatorium

Überblick über die Entwicklung der Messsysteme und über die Aufgaben der Fundamentalstation

1. Einführung

Messungen zu extragalaktischen Radioquellen mit Radioteleskopen (VLBI: Very Long Baseline Interferometry), Entfernungsmessungen zu künstlichen Erdsatelliten und zum Mond mit Lasersystemen (SLR/LLR), sowie die Nutzung von satellitengestützten Navigationssystemen wie GPS haben in den letzten Jahren grundlegend neue Kenntnisse in der geodätischen Forschung gebracht. Sie haben nachhaltig neue Verfahren in der Geodäsie, der Vermessungspraxis und in der Navigation erschlossen. Nicht nur der Genauigkeitsgewinn, sondern auch die Wirtschaftlichkeit war für den Siegeszug dieser neuen Raummessverfahren entscheidend. Die Bewegung der Kontinente wurde erstmalig signifikant nachgewiesen, Schwankungen der Erdrotation wurden genau erfasst, das Schwerfeld der Erde wurde mit hoher Auflösung bestimmt u.v.m. . Ohne diese Kenntnisse wäre u. a. die Entwicklung satellitengestützter Navigationssysteme wie GPS oder künftig GALILEO, die inzwischen einen bedeutenden Stellenwert in vielen Lebensbereichen einnehmen, nicht denkbar.

Ein raumfestes Bezugssystem, in dem Sterne, Planeten, Monde und Satelliten mit höchster Genauigkeit positioniert werden können, wurde international eingeführt. Quasare, das sind extragalaktische Radioquellen, erwiesen sich als stabile Punkte im Raum. Ihre Positionen, festgelegt durch Koordinaten, realisieren den ICRF (International Celestial Reference Frame). Auch ein globales, erdfestes Bezugssystem wurde geschaffen. Global verteilte Positionen auf der Erdoberfläche (Abbildung 1), vergleichbar trigonometrischen Punkten der Landesvermessung, realisieren den ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Ihre Raumkoordinaten X,Y,Z oder geografische Länge, Breite und Höhe sowie Positionsveränderungen infolge der tektonischen Plattenbewegungen sind bestimmt worden. Die Drehbewegung der Erde spielt eine Schlüsselrolle, um das raumfeste und das erdfeste System miteinander zu verbinden. Transformationen zwischen den Bezugssystemen sind notwendig, um die Beobachtungsobjekte wie Satelliten, Mond, Sterne oder Quasare, die nicht mit der Erde rotieren, aber von Stationen auf der Erde beobachtet werden, mathematisch in Beziehung zu setzen. Die Erdrotation spielt daher eine zentrale Rolle, um Beobachtungsobjekte, Beobachtungen und Stationspositionen zu verknüpfen.

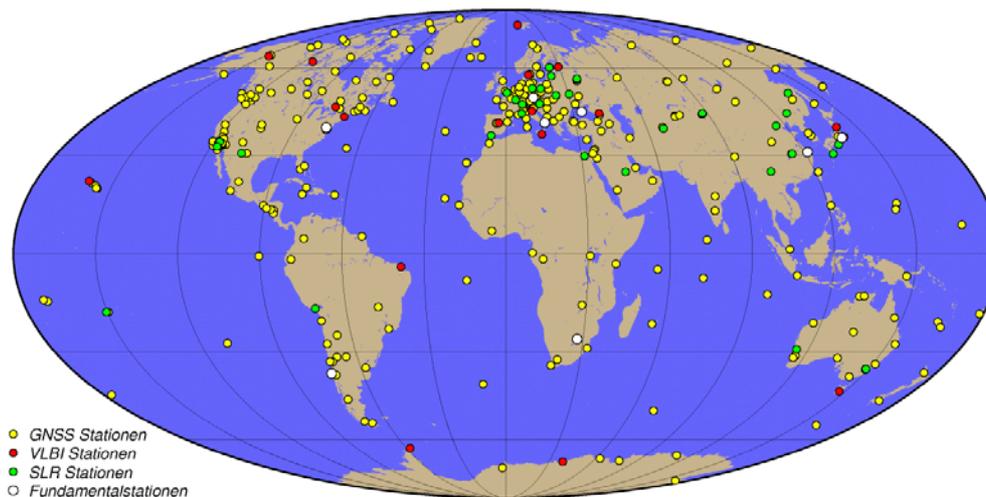
Unregelmäßigkeiten, hervorgerufen durch interkontinentale, regionale oder gar lokale Krustenbewegungen oder als Folge von Massenbewegungen, die u. a. durch Winde in der Atmosphäre oder durch Strömungen in den Ozeanen hervorgerufen werden, verursachen nicht vorhersehbare Veränderungen der Positionen bzw. der Erdrotation. Würde man diese Unregelmäßigkeiten vernachlässigen, würden sich die Bezugssysteme mit der Zeit deutlich verschlechtern. Beobachtungen auf global verteilten Messstationen erfassen diese Unregelmäßigkeiten. Die Laufendhaltung der Referenzsysteme erfordert daher, will man eine Verschlechterung mit der Zeit vermeiden, kontinuierliche Beobachtungen. 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 (Internationale Assoziation für Geodäsie) internationale Dienste etabliert, die Beobachtungen, Datenfluss, Analyse und technologische Entwicklungen innerhalb der einzelnen Raummessverfahren koordinieren. Zu nennen ist der

- International GNSS Service (IGS),
- International Laser Ranging Service (ILRS),
- International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) sowie der
- International Earth Rotation and Reference Frame Service (IERS).

Der IGS, ILRS und IVS sind Dienste der verschiedenen Raummessverfahren. Der IERS kombiniert die Ergebnisse dieser Dienste. Seine 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. Die wesentlichen Produkte zusammengefasst sind:

- **ICRF:** das inertielle, raumfeste Referenzsystem, realisiert durch Positionen der Quasare,
- **ITRF:** das erdfeste Bezugssystem, realisiert und laufend gehalten durch Positionen und Bewegungsvektoren globale verteilter Messstationen,
- **EOP:** Earth Orientation Parameter, die Richtung der Rotationsachse im raumfesten und erdfesten System, sowie die Drehgeschwindigkeit der Erde beschreiben. Parameter, die eine Transformation zwischen ITRF und ICRF erlauben.

Abbildung 1, weltweite Verteilung der Beobachtungsstationen, die den ITRF realisieren.



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, aus dem die heutige Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) hervorgegangen ist. An der FGS beteiligen sich das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München, das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut und die Universität Bonn. Die FGS unterstützt maßgeblich die internationalen Dienste durch Beobachtungen, Vorhalten von Datenbanken und Analysezentren. Mit der Fundamentalstation Wettzell (FS-Wettzell), die vom BKG gemeinsam mit der FESG betrieben wird, hat Deutschland eine führende Rolle auf dem Beobachtungssektor. Konsequenterweise werden alle geodätisch relevanten Raummessverfahren eingesetzt und mit den notwendigen in situ Messungen ergänzt, sowie die messtechnische Weiterentwicklung verfolgt.

Das VLBI Verfahren erlaubt direkte Messungen zu Quasaren. Es ist die primäre Technik, mit der das raumfesteste Bezugssystem realisiert wird, es liefert direkt die zuverlässigsten und genauesten Parameter über die Erddrehung. 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 Kalibrierung der Mikrowellentechniken betrachtet. Es bestimmt den Maßstab. Satellitengestützte Navigationssysteme (GNSS) wie GPS, das russische GLONASS oder künftig GALILEO finden eine sehr weite Verbreitung, da sie vielseitig, genau und kostengünstig sind. GNSS-Methoden ermöglichen den Bezug zum globalen Referenzsystem auf allen Ebenen der Georeferenzierung - von der globalen Anwendung z. B. zur Bestimmung von Veränderungen auf der Erdoberfläche (Plattentektonik, Meeresspiegelveränderungen) über regionale Verdichtungen des ITRF (EUREF (Europa), GREF (Deutschland), SAPOS (Bundesländer)) bis hin zur Punktbestimmung im Alltag.

Fundamentalstationen ermöglichen die Kombination der verschiedenen Messtechniken, da die geometrischen Beziehungen (Zentrierungen) zwischen den Messsystemen lokal gemessen und bekannt sind. Dadurch können zum einen die Messergebnisse der unterschiedlichen Techniken verglichen werden, zum anderen die unterschiedlichen Vorteile der Methoden gemeinsam genutzt werden. Weltweit gibt es derzeit 7 Fundamentalstationen, die über VLBI-, SLR- und GNSS-Systeme verfügen.

2. Von der Satellitenbeobachtungsstation zur Fundamentalstation

Die Anfänge der Fundamentalstation Wettzell reichen zurück in den Herbst 1971. 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 Identification Zone) ausgewiesen, in dem ein Flugsperregebiet 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 1. Generation (Messgenauigkeit: 1 m) installiert, das in einer einfachen Schutzhütte mit einem fahrbarem Dach und einem Holzhaus untergebracht werden konnte. Bereits im Jahre 1977 wurde das Laserentfernungsmesssystem der 1. Generation durch ein System der 3. Generation (Messgenauigkeit: Zentimeter) abgelöst. Die Arbeiten und insbesondere die Ausbaumaßnahmen zu einer Fundamentalstation wurden bis 1986 im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Satellitengeodäsie (SFB 78) durchgeführt. Die Fundamentalstation Wettzell (Abbildung 2) verfügt derzeit über

- ein **20 m-Radioteleskop**, speziell konzipiert für die geodätische Very Long Baseline Interferometry (VLBI), das 1983 operationell fertiggestellt war.
- 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.
- **5 stationär installierte GNSS-Empfänger** (Typ: TURBO-ROGUE ACT, Trimble SSI, ASHTECH, JAVAD und Septentrio). Wettzell ist eine sogenannte "Core-Station" von IGS, EUREF und von GREF. Mit der Einrichtung permanenter Stationen wurde Mitte der 90er Jahre begonnen.
- **30 "remote"-kontrollierte, permanent eingerichtete GNSS-Stationen**, die im Rahmen des IGS, EUREF-Perm und GREF betrieben werden.
- ein **Zeit- und Frequenzsystem**, zur Bereitstellung der notwendigen Zeitskalen und Bezugsfrequenzen.
- ein **supraleitendes Gravimeter**, zur Erfassung örtlicher Schwereänderungen (z. B. als Folge der Erdzeiten),
- einen **Seismographen**, zur Registrierung von Erdbeben (in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Geophysik der Universität München),
- eine **Wetterstation mit einem Wasserdampfradiometer**, zur Erfassung der meteorologischen Daten (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.

Abbildung 2, Fundamentalstation Wettzell



Mit Blick auf die unzureichende globale Verteilung von Fundamentalstationen wurde im Verantwortungsbereich der Fundamentalstation Wettzell von 1993 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.

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, mit dem wertvolle VLBI Beobachtungsreihen gemessen werden konnten. 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. 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.

3. Entwicklung der Messsysteme und der derzeitige Stand

3.1 Das 20 m Radioteleskop

In der VLBI werden Milliarden Lichtjahre entfernte Radioquellen (Quasare) von mindestens zwei Radioteleskopen gleichzeitig angemessen. (Abbildung 3) Dabei werden die Mikrowellen empfangen, digitalisiert und zusammen mit der Zeitinformation einer Atomuhr auf Datenträger aufgezeichnet. Die Daten werden von allen beteiligten Teleskopen zu einem Korrelator geschickt, der durch Korrelation der Signale miteinander die Signallaufzeitunterschiede zwischen den Radioteleskopen ermittelt. Aus den Laufzeitdifferenzen werden dann die Längen der Basislinien, die Erdrotationsparameter u.a.m. abgeleitet.

Das 20 m Radioteleskop der Station Wettzell (RTW) wurde im Jahre 1980 ausschließlich für die geodätische Nutzung der Radiointerferometrie konzipiert (Abbildung 4). 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 (20m Durchmesser, Paraboloid, 9 m Brennweite) und Subreflektor (2,7m Durchmesser, Hyperboloid),
- Frequenzbereich bis zu 25 GHz,
- Alt/Azimut-Montierung, Drehbereich im Azimut:-90° bis +450°, in Elevation: 0° bis 90°.

Zur Datenaufzeichnung wurde anfangs das von der NASA entwickelte "Data Acquisition Terminal MK III" eingesetzt, das es erlaubte, die große Datenmengen (~1-2 Terabyte pro Tag) auf spezielle Magnetbänder aufzuzeichnen. Heute wird das auf Festplattenbasierende MK V- System genutzt. Das System erlaubt es, neben der Speicherung einer großen Datenmenge (~4Terabyte) die Daten mit einer sehr schnellen Aufzeichnungsrate bis zu 2 Gigabit pro Sekunde aufzuzeichnen. Es ist zudem INTERNET- fähig und ermöglicht, die große Datenmengen über schnelle INTERNET- Anbindungen zu einem 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.

Abbildung 3, VLBI Messprinzip

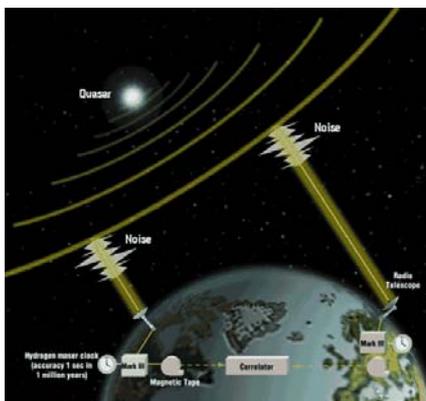


Abbildung 4, 20 m-Radioteleskop Wettzell



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 geodätische VLBI- Messserien einbezogen wird, die zur Bestimmung des ICRF, des ITRF, der EOP's und der Plattenbewegung dienen. Exemplarisch für VLBI- Ergebnisse sind in Abbildung 5 die Änderungen der Basislinie zwischen den Stationen Wettzell und Westford bei Boston (USA) (ca. 6000 km) und in Abbildung 6 die Polbewegung dargestellt. Die Veränderung der Länge der Basislinie zwischen Wettzell und Westford belegt die Kontinentaldrift zwischen Europa und Nordamerika. Die Polbewegung ist eine Folge der Massenverschiebungen was zu Oszillation der Erdachse mit Perioden von 365 und 435 Tagen (Chandler Wobble) führt.

Abbildung 5, Zeitliche Veränderung der Basislinie Wettzell – Westford/USA (5998km)

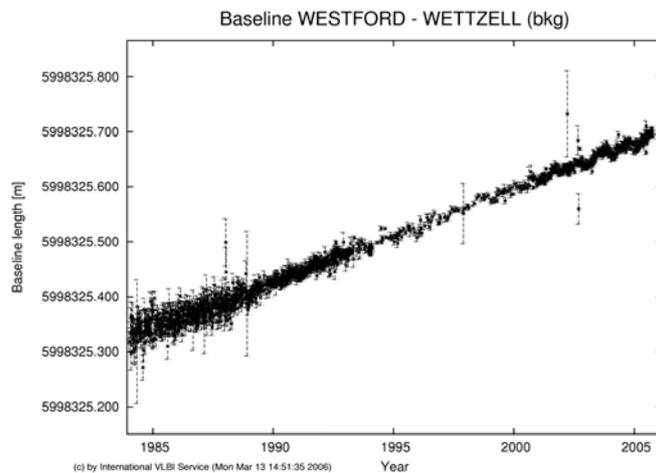
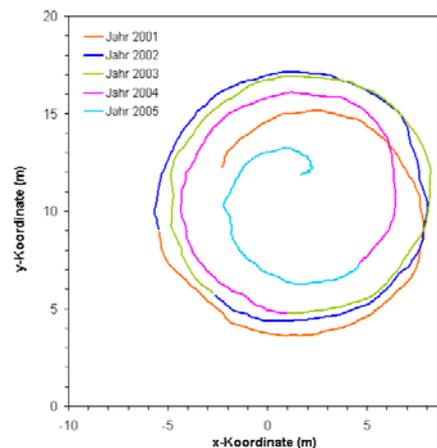


Abbildung 6, Polbewegung von 2001 bis 2005



3.2 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 mit optischen Signalen). Aus der Laufzeit des Signals kann auf die Entfernung geschlossen werden. (Abbildung 7).

Das Institut für Angewandte Geodäsie, aus dem das heutige BKG hervorgegangen ist, erkannte diese entscheidende Technologie und richtete die Satellitenbeobachtungsstation Wettzell ein mit dem Ziel, dort ein System der 1. Generation zu erproben. Mit diesem System, das Metergenauigkeit aufwies, wurden wesentliche Erfahrungen gesammelt, sodass bereits Mitte der 70er Jahre ein System der 3. 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 Zentimetergenauigkeit am Tage und in der Nacht als auch zum Mond zu messen. Die technischen Spezifikationen lassen sich wie folgt skizzieren:

- optisches 75 cm-Teleskop auf einer Alt/Az-Montierung (Abbildung 8) zum Senden der Laserpulse und zum Empfangen der am Satelliten reflektierten Pulse,
- ND:YAG-Laser mit drei Verstärkerstufen (Infrarot (1064 nm) und Grün (532 nm)) zur Generierung der Laserpulse im 10 Hz Takt und mit einer Pulsleistung von etwa 100mJ,
- Detektionssystem mit verschiedenen Empfängern (Mikrokanal-Photomultiplier mit 30 ps Jitter und Mehrphotonenauflösung, hochempfindliche Avalanche Photo Dioden auch für den Infrarotbereich, Streakkamera) zur Erfassung der reflektierten Pulse,
- Mehrkanal Eventtimer (ET) mit 2 ps Messgenauigkeit zur Erfassung der Pulslaufzeiten.

Seit Mitte 1991 wird das System in drei Schichten, 24 Stunden pro Tag an 350 Tagen im Jahr betrieben. Beobachtet werden die geodätischen Satelliten wie LAGEOS 1 und 2 (~6.000km Flughöhe), Starlette und Stella (~1.000km Flughöhe), ETALON 1 und 2 (~20.000 km Flughöhe), AJISAIL 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 einbezogen.

Abbildung 7, Messprinzip SLR

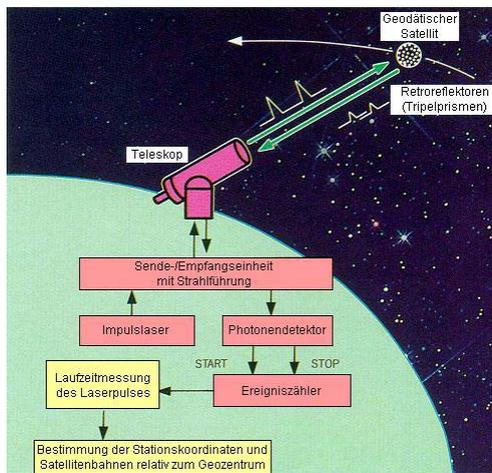


Abbildung 8, WLRS 75cm-Teleskop



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 Routinemessprogramm aufgenommen sind. Das neue System mit der Bezeichnung SOS_W (Satellite Observing System Wettzell) ist daher nur für Satellitenmessungen ausgelegt. 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 Ende 2007 messbereit sein. Es ist geplant, WLRS für hochfliegende Satelliten (GALILEO) und für die Entfernungsmessung zum Mond zu optimieren, sobald SOS_W operationell ist.

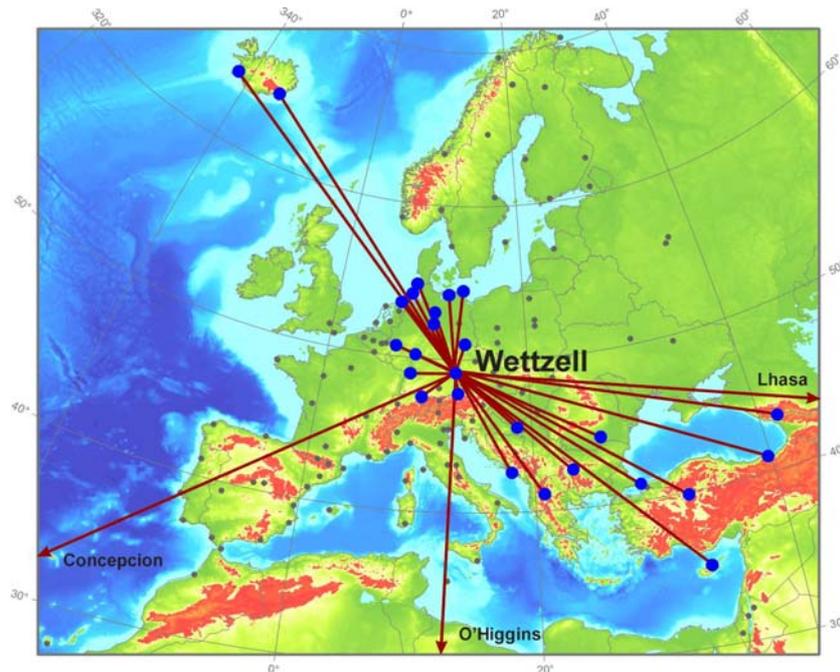
3.3 Permanente GNSS-Stationen

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 8 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 heute 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- und 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 (Abbildung 9). Stationen in Lhasa/Tibet, O'Higgins/Antarktis, Reykjavik und Höfn in Island, und Concepcion/Chile werden von der FS-Wettzell aus per „remote control“ überwacht. Im Bereich von Europa wurde ein regionales Netz (EUREF-perm) aufgebaut. 8 Stationen davon werden von der FS-Wettzell betreut. Ebenso wurde ein Netz auf dem Gebiet der Bundesrepublik mit über 20 Stationen (GREF) eingerichtet, die u. a. in dem Satellitenpositionierdienst SAPOS der AdV integriert sind. 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 Feuchtgehalts der Luft genutzt.

Abbildung 9, GNSS Stationen, die von der FS-Wettzell „remote“ überwacht werden



3.4 Zeit und Frequenz

Genau und zuverlässige Zeitangaben sowie die Verfügbarkeit hochgenauer Bezugsfrequenzen sind für die geodätischen Raumverfahren unabdingbar. Bezugsepochen müssen z. B. 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 (Abbildung 10 und 11). Das Zeitsystem der Station Wettzell basiert auf

- 5 Cäsiumfrequenznormale mit Zeitgeneratoren (Cäsium-Atomuhren), die eine lokale Zeitskala generieren,
- 3 Wasserstoffmaser, die sehr stabile Frequenzen für VLBI- und GPS-Messungen zur Verfügung stellen,
- 2 GPS-Zeitempfänger, mit denen die lokale Zeitskala an international verfügbare Zeitskalen [UTC(BIPM), UTC(USNO)] durch Zeitvergleich über GPS angebunden werden.

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 250) berechnet wird. Die Ablagen der Zeitskala UTC (Wettzell) gegenüber UTC werden im Circular T des BIPM veröffentlicht.

3.5 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.
- seismische Beobachtungen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geophysik der Universität München 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.

Abbildung 10, Zeitmessplatz



Abbildung 11, Wasserstoffmaser



4. TIGO, das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium

Globale geodätische Aufgaben erfordern ein global gleichmäßig verteiltes Netz von Fundamentalstationen. Das existierende globale Punktfeld insbesondere von Fundamentalstationen ist immer noch unzureichend. Es gibt große Lücken auf der Südhalbkugel und in Asien. Eine deutliche Verbesserung der Situation wurde durch den Einsatz von TIGO, dem Transportablen Integrierten Geodätischen Observatorium, in Concepcion/Chile erreicht.

Abbildung 12, das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium TIGO



Das technische Konzept von TIGO wurde 1992 erarbeitet. Erste Aufträge zum Bau der aufwendigen Komponenten konnten noch im gleichen Jahr vergeben werden. Die Auslieferung der meisten Systemteile erfolgte 1996. Im Jahr 1995 wurden die notwendigen Infrastrukturmaßnahmen zum Aufbau und zur Erprobung in Wettzell realisiert. Es wurden Plattformen zur Aufstellung des VLBI-, des SLR-Moduls und der Container gebaut. 1997 ist mit Inbetriebnahme der einzelnen Messmodule und die Integration zu einem Observatorium begonnen worden. TIGO kann in insgesamt sechs Normcontainern für den Transport verstaut werden. Am Einsatzort dienen die Container als Betriebsräume, Werkstätten und Aufenthaltsräume.

Im Sommer 1999 wurde eine Ausschreibung veröffentlicht, mit dem Ziel, geeignete Partner für den Feldbetrieb von TIGO zu finden. Es gingen Bewerbungen ein aus Brasilien, Argentinien, Chile, Indien, Indonesien und den Philippinen. Nachdem die Stationen erkundet waren und die Institutionen sich schriftlich erklärten, welche Leistungen sie übernehmen könnten, konnte der Einsatzort für TIGO vorentschieden werden. Unter Bewertung der Kriterien des größtmöglichen Beitrags zum ITRF, der geologischen und meteorologischen Voraussetzungen, der Unterstützung des Partnerinstitutes und der Nutzung der Daten für gemeinsame wissenschaftliche Arbeiten, wurde als geeigneter Standort Concepción/Chile ausgewählt. Nachdem zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Republik Chile ein Notenwechsel erfolgte, konnte im Jahr 2001 TIGO nach Concepcion/Chile verfrachtet werden. Im April 2002 wurde der Betrieb mit dem VLBI-, und SLR-System, den GPS-Stationen und den örtlichen Messsystemen aufgenommen. Die Daten werden über die internationalen Dienste bereitgestellt, sie tragen insbesondere zur Verbesserung der globalen Referenzsysteme bei. Das BKG betreibt TIGO gemeinsam mit einem chilenischen Konsortium, das von der Universität Concepcion geleitet wird.

Die Beobachtungsstation O'Higgins

Auf der Nordspitze der Antarktischen Halbinsel betreibt das BKG gemeinsam mit der DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) die Antarktisstation O'Higgins. Hauptsystem ist ein 9m Radioteleskop, das vom BKG für VLBI, von der DLR zur Erfassung der Daten von Erdkundungssatelliten 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 werden jeweils 4-6 VLBI Kampagnen durchgeführt und die notwendigen Wartung und Erhaltungsmaßnahmen getroffen.

Abbildung 11, die Beobachtungsstation O'Higgins



5. Laserkreislauf zur Erfassung von Variationen der Erdrotation

Mit großen Ringlasern werden neue Wege beschritten, um die Drehgeschwindigkeit der Erde zu erfassen. Das Prinzip eines Ringlasers oder Laserkreislaufs beruht auf dem "Sagnac Effekt": Umläuft Licht - umgelenkt über Spiegel - eine Fläche rechts oder links herum, so ist im ruhenden System die Umlaufzeit gleich. Dreht sich jedoch die gesamte Apparatur, so ist die Umlaufzeit des Lichtes länger, das gleichsinnig mit der Drehung umläuft, die Umlaufzeit des gegensinnig umlaufenden Lichtes

kürzer. Dieser Effekt kann bei Überlagerung des links und rechts umlaufenden Lichtes in Form einer Schwebungsfrequenz beobachtet werden, die abhängig von der Drehgeschwindigkeit ist. Auf der sich drehenden Erde ist damit ein Laserkreisel ein lokaler Erdrotationssensor, 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 gesehen. Die Ergebnisse können lokal beobachtet und echtzeitnah bereitgestellt werden.

Mit dem Bau des Großringlasers „G“ wurde im Jahr 1999 auf der Fundamentalstation-Wetzell begonnen. Ziel ist es, eine Gesamtempfindlichkeit von $10^{-9} \Omega_{\oplus}$ (Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation) bei einer Zeitauflösung von 1-2 Stunden zu erreichen. Der Ringlaser, der eine Fläche von 4m x 4m umspannt, ist in einem unterirdischen Labor untergebracht. Nur dadurch können die erforderliche hohe Temperaturkonstanz sichergestellt und die bestmögliche Abschirmung von Rotationsanteile erzeugenden Umgebungseinflüssen erreicht werden. Nach einer Bauzeit von etwa 3 Jahren wurde Ende 2001 mit dem Messbetrieb begonnen. Mit einer Auflösung von $10^{-8} \Omega_{\oplus}$ ist „G“ der weltweit genaueste Rotationssensor. Es konnten erstmals die täglichen Polbewegungen von wenigen 10er cm messtechnisch nachgewiesen werden, die bisher nur theoretisch vorausgesagt und abgeschätzt wurden.

Abbildung 12, Großringlaser „G“



Abbildung 13, Schema des Tiefenlabors

