

Die geodätische VLBI in Deutschland

Axel Nothnagel, Wolfgang Schlüter und Hermann Seeger

Zusammenfassung

Seit den ersten Anfängen der geodätischen VLBI (Very Long Baseline Interferometry) Ende der siebziger Jahre mit Beobachtungen, die im wahrsten Sinne des Wortes als Experimente abliefen, haben sich sowohl die Technik als auch die Organisation der VLBI-Messungen durch vielerlei Entwicklungen zu einem weltweiten, operationellen Verfahren weiterentwickelt. Institutionen in der Bundesrepublik Deutschland waren und sind maßgeblich daran beteiligt, dass die geodätische VLBI ihr Potenzial im Rahmen eines weltweiten Verbundes voll entfalten kann. Die Entwicklungsgeschichte in Deutschland, aber auch in Europa ist eng verknüpft mit einem Namen: Prof. James Campbell. Seine Pensionierung ist der Anlass, um die Entwicklung noch einmal in einem gemeinsamen Kontext darzustellen.

Summary

In the early days of geodetic VLBI (Very Long Baseline Interferometry) at the end of the seventies, VLBI observations rather resembled real experiments than measurements in its own meaning. Since then geodetic VLBI has been developed into a truly global, operational technique with widespread applications in positioning, navigation, and global monitoring. In Germany, quite some effort has been undertaken to develop the full potential of geodetic VLBI within a global consortium of institutions. The story of geodetic VLBI in Germany but also in Europe is closely linked to one name: Prof. James Campbell. His retirement has triggered the idea to write down the history of geodetic VLBI in Germany.

1 Motivation

Seit Ende der siebziger Jahre ist in Deutschland das Messverfahren VLBI aufs Engste mit dem Namen James Campbell verknüpft. Wie kein anderer hat Prof. Campbell in dieser Zeit die Entwicklung und den Fortschritt der geodätischen VLBI in Deutschland und in Europa geprägt. Wir möchten Prof. Campbell die Ehre erweisen, aus Anlass seiner Pensionierung noch einmal die Entwicklung Revue passieren zu lassen und auf verschiedene wichtige Entwicklungsschritte hinzuweisen.

Die Radiointerferometrie auf langen Basen, besser bekannt als VLBI, aus dem Englischen für Very Long Baseline Interferometry, hat sich zu einem unverzichtbaren Bestandteil der Geodäsie entwickelt. Die Überwachung der Erdrotation sowie die Schaffung und Weiterentwicklung des terrestrischen Referenznetzes mittels VLBI finden ihren direkten Niederschlag in solch täglichen Anwendungen wie der GPS-gestützten Grundlagenvermes-

sung oder der Fahrzeugortung, auch wenn diese Tatsache vielen nicht bekannt ist. So ist z. B. das ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) u. a. auf der Grundlage eines übergeordneten VLBI-Netzes eingerichtet worden, das zum Teil mit transportablen Radioteleskopen auf Punkten in Europa gemessen wurde (Seeger et al. 2002). Die von den GPS-Satelliten abgestrahlten Bahninformationen (Broadcast Ephemerides) werden wiederum mittels Erdrotationsparametern, die regelmäßig mit VLBI bestimmt werden, vom raumfesten in ein erdfestes Koordinatensystem transformiert.

Wichtig ist auch, dass die Bundesrepublik Deutschland mittlerweile zu einem der weltweit führenden Länder bei der Entwicklung und Anwendung der geodätischen VLBI gehört. Neben vier kompatiblen Radioteleskopen, die mehr oder weniger intensiv für innereuropäische und interkontinentale geodätische Messungen genutzt werden, stehen in Deutschland heute ein 8-Stationen Korrelator, ein globales Datenzentrum und drei VLBI-Analysezentren zur Verfügung (IVS 2004). Die daran beteiligten deutschen Institutionen sind seit vielen Jahren erfolgreich in der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie zusammengeschlossen (Schneider 1992). Die weltweiten Aktivitäten dieser Gruppe auf dem Gebiet der geodätischen VLBI sind eingebunden in den »International VLBI Service for Geodesy and Astrometry« (IVS), zu dessen Gründermitgliedern auch Prof. Campbell gehört.

Ausführliche Erläuterungen zum Verfahren der geodätischen VLBI finden sich u. a. bei Campbell et al. 1992a, Campbell et al. 1992b sowie Campbell und Nothnagel 1996.

2 Der Einstieg in die geodätische VLBI

Wissenschaftliche und praktische Arbeiten auf dem Gebiet der geodätischen Raumverfahren wurden in Europa in größerem Umfang erstmalig Mitte der sechziger Jahre betrieben. Mit Hilfe der optischen Satellitengeodäsie wurden damals im Rahmen der Westeuropäischen Satellitentriangulation (WEST) Positionsgenauigkeiten im Bereich von bestenfalls 5 m erreicht. Die um 1975 angelauftenen Arbeiten auf dem Gebiet der Dopplerpositionierung auf der Basis des »Navy Navigation Satellite Systems« (NNSS) ergaben absolute Genauigkeiten im Bereich von 1–2 m und relative Genauigkeiten von 0,3–0,4 m. Ab 1972 wurden in Deutschland Laserentfernungsmessungen nach künstlichen Satelliten (SLR) durchgeführt, wobei Genauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter erreicht wurden.

Ab 1968/69 wurden am damaligen Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG) in Frankfurt a. M. in der Gruppierung um Heitz und Seeger Pläne zur Realisierung einer deutschen Geodätischen Fundamentalstation erarbeitet. Es ging dabei in der Hauptsache darum, eine räumliche Konzentration aller geodätischen Raumverfahren in einem Observatorium sicherzustellen. Nur dadurch können die verschiedenen Referenzsysteme verknüpft und systematische Fehlereinflüsse zwischen den einzelnen Beobachtungstechniken erfasst werden. Zunächst hatte man dabei nur an die optische Richtungsmessung, die Laserentfernungsmessung zu Satelliten und die Mikrowellen-Positionsbestimmung gedacht. Eine Einbeziehung der um 1970 in den USA und in Kanada vorgeschlagenen Radiointerferometrie wurde zunächst nicht in Erwürfung gezogen, da man davon ausgehen musste, dass das Verfahren der VLBI die finanziellen und personellen Möglichkeiten bei weitem überfordern würde.

Die unter dem Begriff VLBI bekannt gewordene Interferometrie ohne Kabelverbindung wurde erst ermöglicht, nachdem hochpräzise Atomfrequenznormale entwickelt worden waren. Das Verfahren wurde fast gleichzeitig in Kanada (Brotman et. al. 1967) und in den USA (Bare et. al. 1967), gestützt auf eine Datenaufzeichnung auf 9-Spur Computerbändern (erste Generation = Mark I), vorgeschlagen und realisiert. In einem ersten deutschen Beitrag hat Witte (1971) die Möglichkeiten und damaligen Grenzen des Verfahrens für geodätische Anwendungen beleuchtet. Durch speziell auf astronomisch-geodätische Fragestellungen ausgerichtete Experimente wurden dann von Shapiro et al. (1972 und 1973) nachgewiesen, dass man mit Hilfe der VLBI die Positionen von Radioquellen auf einige hundertstel Bogensekunden (arcsec) und die Komponenten der Basislinien zwischen den Radioteleskopen auf wenige Dezimeter bestimmen kann (Shapiro et al. 1974). Von Vorteil ist dabei, dass die Beobachtungen wetterunabhängig sind und Ergebnisse bezogen auf das Inertialsystem der Radiogalaxien und Quasare (Quasistellare Objekte) am Rande des uns bekannten Universums liefern.

Am Geodätischen Institut der Universität Bonn haben kurz darauf Campbell, Seeber und Witte (z. B. Campbell und Witte 1978) sowie später auch Bonatz und Brosche Interesse für die VLBI entwickelt und erste diesbezügliche Arbeiten begonnen. Hieraus ist 1977 eine erste Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) mit Verlängerung bis 1983 erwachsen. Auf- und Ausbau der geodätischen VLBI-Gruppe in Bonn konnten letztlich nur gelingen, weil es in Bonn bereits das Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) gab, an dem vielfältige Erfahrungen auf dem Gebiet vorlagen und an dem damals ein VLBI-Korrelator der zweiten Generation (Mark II) betrieben wurde. Schon früh wurde dieser auch für einige geodätische Experimente mit Stationen in Europa und Übersee durch die Gruppe um Prof. Campbell genutzt und erste Basislinien mit Dezimetergenauigkeit gemessen.

3 Mark III und das Radioteleskop Wettzell

Da das 100 m-Radioteleskop des MPIfR bei Effelsberg/Eifel regelmäßig außerordentlich stark mit astronomischen Messungen ausgelastet war, zeichnete sich rasch ab, dass der Geodäsie, wenn überhaupt, nur in sehr begrenztem Umfang Beobachtungszeit eingeräumt werden konnte. Schon bald haben daher Überlegungen begonnen, das Radioteleskop der Astronomischen Institute der Universität Bonn auf dem Stockert in der Eifel bzw. der FGAN (Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften) in Werthoven bei Bonn für geodätische Experimente zu nutzen. Eine überraschende Wendung nahm die Entwicklung, als der Sprecher des Sonderforschungsbereichs 78 »Satellitengeodäsie« (SFB 78), Prof. Schneider, den Ausbau der Satellitenbeobachtungsstation Wettzell im Bayerischen Wald zu einer Fundamentalstation anregte und der Plan eines eigenen Radioteleskops für primär geodätische Anwendungen reifte.

Parallel zu diesen Überlegungen entwickelte die NASA in Zusammenarbeit mit dem Massachusetts Institute of

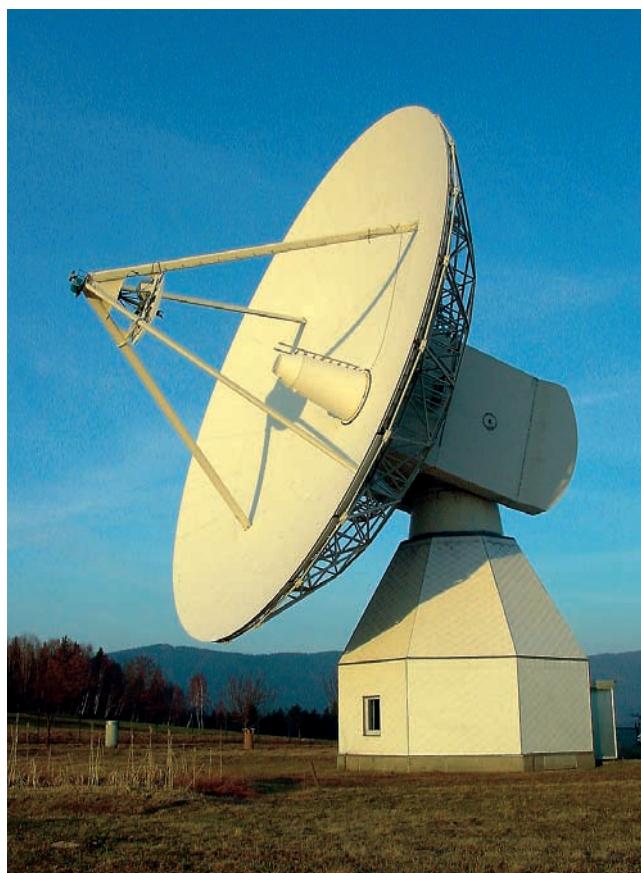


Abb. 1: Das 20 m-Radioteleskop Wettzell

Technology (MIT) seit Ende der siebziger Jahre das Mark-III-Aufnahmesystem der dritten Generation. Primär sollte dieses zwar für geodätische Anwendungen höchster Genauigkeit (wenige Zentimeter über interkontinentale Entferungen) eingesetzt werden, es erlaubte aber gleichwohl eine Genauigkeitssteigerung bei astronomischen Beobachtungen. Aus diesem Grund wurde in Europa

auch auf astronomischer Seite die wegweisende Entscheidung getroffen, das Mark-III-System für astronomische Messungen zum Standard zu erheben. Zum einen entschieden sich dadurch viele der Institute mit astronomischen Radioteleskopen für die Anschaffung eines solchen Systems. Zum anderen nahm das MPIfR in Bonn im Jahre 1983 einen astronomischen Mark-III-Korrelator mit drei Bandstationen in Betrieb, der aufgrund seiner Entwicklungsgeschichte ohne weitere Modifikationen auch für die Korrelation geodätischer Messungen genutzt werden konnte.

Die Entwicklung eines Aufnahmesystems höchster Genauigkeit und die Aussicht auf einen entsprechenden Korrelator in nächster Nähe zum Geodätischen Institut der Universität Bonn waren weitere bedeutende Argumente für die Planung und Ausstattung eines eigenen geodätischen Radioteleskops. So wurde auf dem Gelände der Satellitenbeobachtungsstation Wettzell ein 20 m-Radioteleskop geplant und mit Mitteln des Instituts für Angewandte Geodäsie (IfAG) und der DFG bis Ende 1983 realisiert.

Bei der Konzeption des Teleskops, das auf eine Genauigkeit globaler Messungen von 1 cm ausgelegt war, wurde besonderer Wert auf die eindeutige Definition des Bezugspunktes als Schnitt der Drehachsen (Azimut/Elevation) und auf die Stabilität der Antenne gelegt. Nach Fertigstellung durch die Arbeitsgemeinschaft der Herstellerfirmen MAN und Krupp sowie der Integration der einzelnen Komponenten konnte das gesamte System im Jahre 1983 getestet und Ende des Jahres bereits in erste interkontinentale Messungen eingebunden werden. Im Rahmen des SFB 78 wurde eine Betriebsmannschaft etabliert, die seitdem aus Mitarbeitern der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München und des IfAG, dem heutigen Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), besteht.

Das Radioteleskop Wettzell, wie es fortan genannt wurde, ist seit 1984 ein wichtiger Eckpfeiler zahlreicher globaler und kontinentaler VLBI-Messreihen, die mittlerweile längst den Status von Experimenten verlassen haben. Motivierend war insbesondere die gerade anlaufende Kampagne MERIT (Monitoring of Earth Rotation and Intercomparison of Techniques) des Bureau International de l'Heure (BIH), eine der Vorläuferorganisationen des internationalen Erdrotationsdienstes (IERS). Diese globale Messkampagne hatte zum Ziel, die klassischen optischen Verfahren, die Dopplerverfahren, Laserentfernungsmessungen zu künstlichen Satelliten und zum Mond sowie die VLBI hinsichtlich Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit zu vergleichen. Für die geodätische VLBI standen seinerzeit Stationen vorwiegend auf dem nordamerikanischen Kontinent zur Verfügung. Mit dem Teleskop Wettzell wurde das Netz um eine Station in Europa nachhaltig erweitert. Dies führte zu einer wesentlich besseren Geometrie des Beobachtungsnetzes und brachte einen signifikanten Gewinn in der Genauigkeit der Polkoordinaten, mehr aber noch bei der Rotationsphase der

Erde (UT1 = Universalzeit 1). Ein ebenso wichtiger Aspekt war aber auch die Tatsache, dass das Teleskop schwerpunktmäßig für geodätische Anwendungen konzipiert war und so eine bis auf Wartungsarbeiten durchgehende Nutzung für geodätische Beobachtungen ermöglichte.

Das Radioteleskop Wettzell konnte von Anfang 1984 bis heute ununterbrochen in regelmäßige VLBI-Kampagnen zur Bestimmung der Erdrotationsparameter eingebunden werden. Die Beobachtungen, die unter wechselnden Kampagnennamen wie POLARIS (Polar Motion by Interferometric Surveying) oder IRIS (International Radio Interferometric Surveying) liefen, dauern in der Regel 24 Stunden und wurden anfangs alle fünf Tage, später, aufgrund reduzierter Ressourcen, wöchentlich wiederholt.

4 Das 9 m-Radioteleskop in der Antarktis

Einige Jahre nach der Inbetriebnahme des Radioteleskops Wettzell bot sich dem IfAG die einmalige Chance, auch in der Antarktis geodätisch aktiv zu werden. In einem gemeinsamen Projekt der DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) und des IfAG, gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), wurde in der Zeit von 1989 bis 1992 die »German Antarctic Receiving Station« (GARS) realisiert. GARS, deren wesentliches Messsystem ein 9 m-Radioteleskop ist, wird sowohl zum Empfang der SAR (Synthetic Aperture

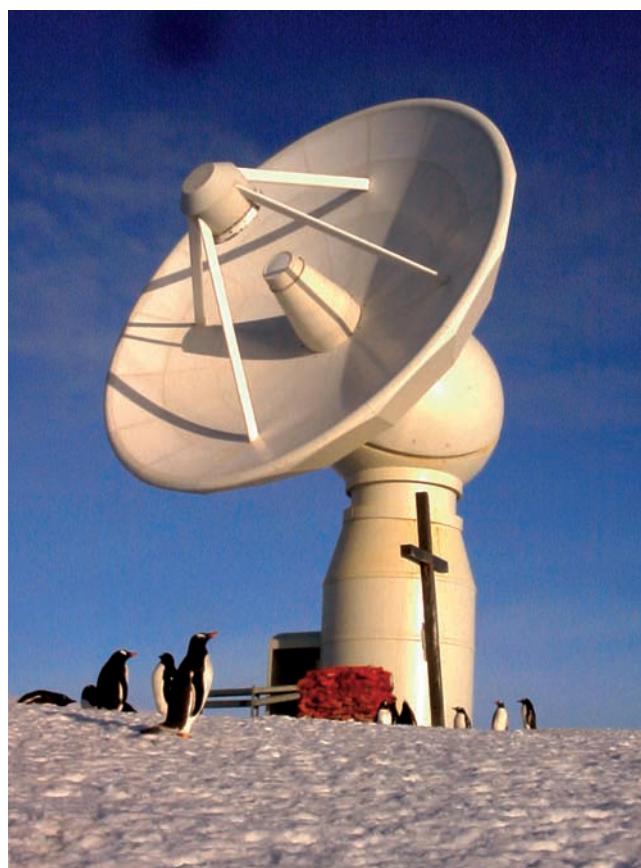


Abb. 2: Das 9 m-Radioteleskop SARS/O'Higgins



Abb. 3: Das 6 m-Radioteleskop des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums (TIGO)

Radar)-Daten der Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS1 und ERS2 als auch zur Durchführung geodätischer VLBI-Beobachtungen auf dem Antarktischen Festland ($57^{\circ} 54' 04''$ W.L.; $63^{\circ} 19' 16''$ S.B.) genutzt. Bei der schwierigen Logistik kommt die Unterstützung durch das chileische Militär zugute, das dort in unmittelbarer Nachbarschaft die Basis »General Bernardo O'Higgins« betreibt.

Seit Januar 1992 werden regelmäßig geodätische VLBI-Messungen durchgeführt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Station nicht kontinuierlich mit dem notwendigen technischen Personal besetzt sein kann. Aus diesem Grund finden die Beobachtungen zweimal im Jahr in Form von Blockmessungen statt, d.h. die Beobachtungstage werden jeweils auf einen kurzen Zeitraum von höchstens vier Wochen komprimiert. Schwerpunktmaßig werden bei diesen Messungen Stationen in der südlichen Hemisphäre zusammengeschaltet, um das Terrestrische Referenzsystem mit einer zusätzlichen Referenzstation in der Antarktis zu stützen und damit die globale Verteilung zu verbessern.

5 VLBI mit dem Transportablen Integrierten Geodätischen Observatorium (TIGO)

Ein weiteres deutsches Radioteleskop für geodätische Anwendungen konnte schließlich am 21. Mai 2002 an seinem Standort bei Concepcion in Chile erstmals an einer interkontinentalen Messung teilnehmen. Dieses 6 m-Radioteleskop ist Bestandteil des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums (TIGO) des BKG (Hase 1999), das im Sinne einer Fundamentalstation in der südlichen Hemisphäre eingesetzt wird. Im Jahr 2004 ist das Radioteleskop bereits an mehr als 120 Tagen für 24-Stunden-Messungen eingeplant. TIGO leistet einen wichtigen Beitrag zur Datengewinnung auf der Südhalbkugel, da

diese nur durch sehr wenige geodätisch nutzbare Radioteleskope bzw. SLR-Stationen abgedeckt ist. Die Messungen dienen sowohl der Bestimmung der Erdrotation als auch der Realisierung und Weiterentwicklung globaler geodätischer Bezugssysteme.

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass auch das 100 m-Radioteleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg in der Eifel einmal im Jahr an geodätischen VLBI-Messungen teilnimmt. Im Rahmen einer rein europäischen Messreihe zur Bestimmung von Stationsbewegungen wird damit ein weiterer Messpunkt auf dem als stabil angenommenen Teil der europäischen Erdkruste realisiert.

6 Technische Weiterentwicklungen

Während der Konzeption, des Baus und der Inbetriebnahme der genannten deutschen Radioteleskope hat auch auf dem Gebiet der Datenregistriereinrichtungen ein kontinuierlicher Weiterentwicklungsprozess stattgefunden. Getrieben wird dieser durch zwei Tatsachen:

1. Je größer die aufgezeichnete Bandbreite, desto genauer die Bestimmung der Laufzeitdifferenz (delay) als primäre Observable der geodätischen VLBI (Campbell et al. 1992b).
2. Je kleiner der Datenträger, desto schneller und preiswerter der Transport.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei dem digitalisierten Rauschsignal der Quasare, das an den Teleskopen registriert wird, bereits um ein quasi-zufälliges Signal handelt, auf das sich Kompressionsalgorithmen nicht anwenden lassen.

Das weltweit meistverbreitete Mark-III-Aufnahmesystem arbeitet auf der Basis von speziellen Magnetbändern mit 2,54 cm Breite auf Spulen mit 36 cm Durchmesser. Es

wurde im Laufe der Zeit kontinuierlich weiterentwickelt, um immer größere Datenmengen speichern zu können. In der letzten Entwicklungsstufe auf der Basis der Magnetbandtechnologie wird mit halb so dicken Bändern im Vergleich zum Ausgangssystem die vierundzwanzigfache Datenmenge aufgezeichnet. Unter dem Namen Mark IV wurde das verbesserte Aufzeichnungssystem im Jahr 2001 an den deutschen VLBI-Stationen installiert.

Die industrielle Entwicklung handelsüblicher Festplatten ist in den letzten Jahren deutlich vorangeschritten. Es kamen Festplatten auf den Markt, die 120 Gbyte Daten und mehr speichern können. Diese Festplatten ermöglichen die Entwicklung von geeigneten Speichersystemen, die auf Festplattenbasis arbeiten und bis Ende 2004 unter dem Namen Mark V alle Magnetband-basierten Systeme ablösen werden. Eine 24-Stunden-Messung kann heutzutage auf acht Magnetplatten, die in einer festen Einheit integriert sind, gespeichert werden.

Die Magnetplattsysteme bieten außerdem, anders als bei sequenziellen Bandsystemen, die Möglichkeit des Direktzugriffs auf einzelne Datensegmente. Dadurch können die Magnetplattsysteme auch zur Pufferung von Daten dienen, was wiederum die Voraussetzung für eine Übertragung der Daten über Breitband-Kommunikationsnetze bzw. langfristig über das Internet (e-VLBI) ist. So werden zur Zeit Pilotprojekte durchgeführt, bei denen die aufgezeichneten Daten über schnelle Netzverbindungen zum Korrelator geschickt werden, wo sie vor der zeitversetzten Korrelation erneut zwischengespeichert werden.

der Laufzeitdifferenzen als primäre Observable dient. Dazu werden mit einer speziellen Systemarchitektur heutzutage mehrere Milliarden Kreuzprodukte pro Sekunde gebildet. Insgesamt stehen mit dem U. S. Naval Observatory in Washington D. C., dem Haystack Observatory des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in der Nähe von Boston und dem MPIfR in Bonn weltweit drei Korrelationszentren zur Verfügung, die mit der Mark-III- bzw. später mit der Mark-IV-Technologie arbeiten. Auf der Basis einer Beteiligung der Geodäsie an Investitionskosten werden seit 1985 regelmäßig Korrelationen geodätischer Messungen am Korrelator des MPIfR durchgeführt. Mitte der 90er Jahre wurden mit Finanzierung durch das IfAG drei weitere Bandmaschinen beschafft, so dass nun unter gewissen Einschränkungen die Daten von bis zu sieben Stationen gleichzeitig korreliert werden konnten.

Einen Quantensprung erlebte die geodätische VLBI im Herbst 2000 als ein neuer Korrelator unter der Bezeichnung Mark IV für erste Testkorrelationen zum Einsatz kam. Zur Bewältigung der weiter steigenden Anforderungen an die Ergebnisse der geodätischen VLBI-Messungen sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht war eine vollständige Neuentwicklung auf der Basis moderner Technologie notwendig geworden. Die Investitionsmittel dafür wurden vom IfAG/BKG getragen, während das MPIfR die Installation und den Betrieb des Korrelators in seinen Räumlichkeiten in Bonn auf der Basis einer 50/50-Nutzung (Geodäsie/Astronomie) sicherstellen konnte. Die regelmäßig anfallenden Korrelationen für die unterschiedlichsten geodätischen Aufgabenstellungen wurden vom Geodätischen Institut der Universität Bonn übernommen.

Ausgelegt für bis zu 16 Stationen, d. h. bis zu 120 Basislinien, konnte dieser Korrelator sofort mit den vorhandenen sieben Bandmaschinen des Mark-III-Korrelators bestückt werden und der Datendurchsatz um mehr als 50% gesteigert werden. Eine weitere, wenn nicht gar die

7 Der Korrelator

Eine zentrale Komponente bei der Durchführung von VLBI-Messungen stellt der VLBI-Korrelator dar, der zur Kreuzkorrelation der Datenströme für die Bestimmung



Abb. 4: Der Mark-IV-Korrelator

entscheidende, Weiterentwicklung stellt die weitaus höhere Bandbreite dar, die mit diesem Korrelator prozessiert werden kann.

Durch den neuen Korrelator konnte umgehend ein neues Konzept für die Abfolge der regelmäßigen Beobachtungsreihen zur Bestimmung der Erdrotationsparameter entwickelt werden. Bis Ende 2001 wurden Messungen zur Überwachung der Erdrotation im wöchentlichen Abstand mit internationaler Beteiligung maßgeblich von den amerikanischen Partnern (NASA und U. S. Naval Observatory) koordiniert und zum Großteil korreliert. Am 1. Januar 2002 wurde eine weitere, wöchentlich stattfindende Beobachtungsreihe zur Bestimmung der Erdrotation gestartet, die zum überwiegenden Teil in die Verantwortung deutscher Institutionen fällt. Dadurch wurde es erstmals möglich, den Abstand der aus VLBI-Beobachtungen gewonnenen Datenpunkte auf dreieinhalb Tage zu reduzieren. Aus logistischen Gründen finden die Messungen jeweils montags und donnerstags statt. Bei beiden Messreihen werden der Transport der Daten und die Prozessierungsschritte möglichst schnell abgearbeitet, um die Ergebnisse den Nutzern umgehend mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit zur Verfügung stellen zu können.

8 VLBI-Datenanalyse

Das letzte Glied in der Kette des VLBI-Prozesses stellt die Auswertung der Beobachtungen und die Berechnung der Zielparameter mit anschließender Datenanalyse dar. Bereits Ende der siebziger Jahre wurde von Prof. Campbell am Geodätischen Institut der Universität Bonn die erfolgreiche Auswertung einzelner VLBI-Experimente durchgeführt. Folgerichtig konnte die Bonner Arbeitsgruppe vom 1. April 1984 an als Teilprojekt B8 in den SFB78 und ab 1987 in die Nachfolgeeinrichtung des SFB78, die »Forschungsgruppe Satellitengeodäsie« (FGS) der TU München integriert werden.

Die allgemeine Zielsetzung der Bonner VLBI-Gruppe spaltet sich in zwei Hauptzweige: die Untersuchung und Weiterentwicklung des VLBI-Verfahrens selbst und die Auswertung sowie wissenschaftliche Nutzung der gewonnenen Daten einschließlich deren Interpretation. Durch den Umstand, dass bei der geodätischen Nutzung des VLBI-Korrelators am MPIfR die Gewinnung der Observablen unmittelbar beeinflusst und untersucht werden kann, bietet sich die Möglichkeit, an der Verbesserung und Weiterentwicklung des Verfahrens mitzuwirken. Die Weiterverarbeitung der Daten bis hin zur Ableitung der gesuchten Parameter wie der Stations- und Quellenkoordinaten, der Erdrotationsparameter und weiterer geodynamischer Größen erfordert, komplexe Auswertemodelle zu entwickeln, sie bei steigender Messgenauigkeit stetig zu verbessern und zu ergänzen. Unter der Leitung von Prof. Campbell entstand so neben einer Vielzahl von Publika-

tionen eine Reihe von Dissertationen, die oft weltweites Interesse hervorriefen.

Anfang der neunziger Jahre begann auch das IfAG mit seiner Außenstelle in Leipzig, VLBI-Beobachtungen auszuwerten und Messergebnisse zu berechnen. Die Bedeutung der VLBI war bis dahin so gestiegen, dass die Bestimmung von Erdrotationsparametern und von terrestrischen Referenznetzen als Aufgaben der Daseinsvorsorge mit vielen verschiedenen Anwendungsbereichen in idealer Weise in das neu definierte Aufgabenfeld des BKG passte.

1995 wurde die geodätische VLBI von einem Absolventen der Bonner VLBI-Gruppe (Dr. Schuh) auch am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI) in München etabliert. Auf der Basis des VLBI-Auswerteprogramms OCCAM wurden hier erste Vergleiche mit anderen Softwarepaketen durchgeführt. In der Folgezeit wurden und werden sowohl Neuentwicklungen und Detailuntersuchungen als auch Routineberechnungen im Rahmen des IVS durchgeführt.

9 Zielsetzungen und Ergebnisse

Die geodätische VLBI ist das einzige Verfahren, mit dem Erdrotationsparameter als geometrische Verbindung zwischen dem quasi-inertialen Referenzrahmen der Quasare und dem terrestrischen Referenzrahmen bestimmt werden können. Dabei führt das Zusammenspiel von Referenzrahmen und Erdrotationsparametern zu einer gegenseitigen Abhängigkeit der erzielbaren Genauigkeiten. Mit einer einzigen 24-stündigen Beobachtungsreihe lassen sich Basislinienlängen je nach Abstand der Stationen mit einer Unsicherheit von 5 bis 15 mm bestimmen. Die höchsten Genauigkeiten für die Positionen der Quasare sowie der Stationskoordinaten und -bewegungen werden allerdings durch Akkumulierung einer Vielzahl von Beobachtungstagen, in aller Regel über mehrere Jahre, erreicht. Die Unsicherheit der Radioquellenpositionen liegt heute durchschnittlich bei ca. 0,2 Millibogensekunden (marcsec), die der Stationskoordinaten bei 1–4 mm und die der Stationsbewegungen bei 0,1–1 mm/Jahr.

Die Stationskoordinaten spielen eine besondere Rolle bei der Realisierung des terrestrischen Referenzsystems (ITRF), u. a. deshalb, weil mit Hilfe der VLBI-Basislinien der globale Netz-Maßstab festgelegt wird. Durch lange Zeitreihen lassen sich außerdem tektonisch bedingte Bewegungen der VLBI-Messstationen bestimmen, die als repräsentativ für die sie tragende Lithosphäre angesehen werden. Der bereits Mitte der achtziger Jahre mit VLBI gelungene Nachweis der von Alfred Wegener veröffentlichten Theorie der Kontinentaldrift oder die Erfassung seismischer und post-seismischer Stationsbewegungen sind eindrucksvolle Beispiele der Leistungsfähigkeit des VLBI-Verfahrens.

Jede VLBI-Beobachtungssession liefert einen aktuellen Satz von Erdrotationsparametern, bestehend aus Nutra-

tionskorrekturen in Länge ($d\Psi$) und Schiefe ($d\delta$), Rotationsphase (UT1) sowie den Polbewegungskomponenten x_p und y_p . Mit ausreichend dimensionierten Stationsnetzen sind Genauigkeiten von unter 0,1 marcsec zu erreichen, die an der Erdoberfläche einer Ablage von 3 mm entsprechen. Für wissenschaftliche Untersuchungen lassen sich die 24-Stunden-Messungen in Stundenintervalle unterteilen, um auch Aussagen über die subtäglichen Variationen in der Polbewegung und der Rotationsphase machen zu können. Die Bestimmung dieser meist gezeiteninduzierten Phänomene ist wegen der geringeren Anzahl von Einzelbeobachtungen pro Zielparameter in der Regel um den Faktor 2–3 ungenauer, dennoch aber ausreichend für einen zweifelsfreien Nachweis.

Die Bewegung der Erdrotationsachse im Raum wird mit Hilfe von Präzessions- und Nutationsmodellen beschrieben. Seit Beginn regelmäßiger VLBI-Beobachtungen konnten die Modelle mit Hilfe des ständig anwachsenden Beobachtungsmaterials schon mehrfach verbessert werden. Unter anderem wurde damit auch die freie Nutation des Erdkerns nachgewiesen.

Aus logistischen Gründen ist es bisher nicht möglich, jede Woche komplett mit sieben 24-stündigen Beobachtungsreihen abzudecken. Bereits zu Beginn der ersten Beobachtungen mit dem Radioteleskop Wettzell zeichnete sich allerdings ab, dass sich die Rotationsphase der Erde (UT1) bzw. die Tageslänge (LOD) so schnell ändert, dass Messungen im Abstand von mehreren Tagen nicht ausreichen. Aus diesem Grund und wegen der Tatsache, dass die VLBI das einzige Messverfahren zur Bestimmung von UT1 ist, werden seit Inbetriebnahme des Radioteleskops Wettzell zusätzliche tägliche Messungen auf einzelnen Basislinien, d. h. mit jeweils nur zwei Stationen, mit einer Dauer von nur ca. einer Stunde zwischen die Netzmessungen geschaltet. Einziger Zielparameter dieser Messungen, die in verschiedenen Konstellationen unter der Bezeichnung »INTENSIVE-Messreihen« durchgeführt werden, ist die Rotationsphase der Erde. Die gemessenen Zeitreihen liefern die Grundlage zur Prädiktion der Differenz zwischen UT1 und der koordinierten Weltzeit UTC, die für die Berechnung der Bahnpараметer von Satelliten und insbesondere für die so genannten »Broadcast«-Ephemeriden der GPS-Satelliten benötigt werden.

10 Die geodätische VLBI in Europa

Zur Zusammenarbeit der europäischen VLBI-Gruppen ist von Prof. Campbell bereits 1980 eine internationale Arbeitsgruppe für astrometrische, geodätische und geodynamische Anwendungen der VLBI gegründet worden. Mit besonderer Weitsicht hat er immer wieder den Anstoß zu regelmäßigen Treffen, den »Working Meetings on European VLBI for Geodesy and Astrometry«, und ab 1989 zur Durchführung rein europäischer VLBI-Messungen gegeben. Insbesondere dadurch, dass sich viele der

astronomischen Teleskope in Europa durch die Beschaffung von Mark-III-Aufnahmesystemen für präzise geodätische Messungen eigneten, und dass Prof. Campbell das Interesse der Verantwortlichen wecken konnte, entstand im Laufe der Zeit ein dichtes kontinentales VLBI-Netzwerk (Campbell und Nothnagel 1996).

Den Höhepunkt erreichten diese Aktivitäten, als Prof. Campbell federführend für eine Gruppe europäischer Wissenschaftler ein Förderprojekt der EU einwerben und im Anschluss eine weitere Verlängerung sicherstellen konnte. Während zuerst die tektonisch bedingten horizontalen Bewegungen im Vordergrund standen, lag die Betonung bei der zweiten Antragsphase auf der Untersuchung vertikaler Bewegungen. Seit 1989 werden regelmäßig vier bis sechs Netzmessungen pro Jahr mit bis zu zehn europäischen Stationen durchgeführt. Mit einer Genauigkeit von ein bis zwei Millimetern in der Lage und besser als 1 mm/Jahr bei den Bewegungen stellt das europäische VLBI-Netz mittlerweile einen »globalen VLBI-Superpunkt« dar (Campbell, Haas, Nothnagel 2002).

11 International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

Nahezu parallel zu den Mark-IV-Entwicklungen auf der Hardware-Seite wurde auch organisatorisch ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu einer globalen Bündelung und zu einem optimierten Einsatz der Ressourcen unternommen. Am 1. März 1999 wurde der »International VLBI Service for Geodesy and Astrometry« (IVS) gegründet, um den Anforderungen für die Zukunft und der Bedeutung der geodätischen VLBI als wichtige Stütze der globalen geodätischen Weiterentwicklung Rechnung zu tragen. Bereits im Februar des folgenden Jahres fand auf Einladung des BKG in Kötzting, Landkreis Cham (Bayerischer Wald), die erste Generalversammlung des IVS statt, an der 124 Fachleute aus 17 Ländern teilnahmen.

Von Beginn an war die Bundesrepublik Deutschland mit einer Vielzahl von Komponenten am IVS beteiligt. Die Radioteleskope der geodätischen Fundamentalstation Wettzell, des Transportablen Integrierten Geodätischen Observatoriums (TIGO) in Concepcion (Chile) und des GARS/O'Higgins bilden wichtige Eckpfeiler des globalen VLBI-Netzes. Der BKG/MPIfR-Mark-IV-Korrelator in Bonn bestreitet mittlerweile 25 % der globalen Korrelationen. Am Geodätischen Institut Bonn wurde ein Operationszentrum für die Planung und Logistik von VLBI-Messreihen etabliert, während die Außenstelle Leipzig des BKG eines der drei globalen Datenzentren des IVS betreibt. In diesem Datenzentrum, das als zentraler Datenübermittlungs- und Datenarchivierungsknoten dient, stehen sowohl die Beobachtungsdaten als auch die Ergebnisse Wissenschaftlern und Nutzern kostenfrei zur Verfügung.

Die Beobachtungsdaten werden in erster Linie von den 15 weltweit verteilten IVS-Analysezentren abgerufen. In

Deutschland ist eines am DGFI und eines als Kooperation zwischen dem BKG (Außenstelle Leipzig) und dem Geodätischen Institut Bonn eingerichtet. Die regelmäßige, mit kurzer zeitlicher Verzögerung berechneten Erdrotationsparameter von sechs der 15 IVS-Analysezentren werden durch den IVS-Analysekoordinator zu einer offiziellen IVS-Zeitreihe kombiniert und dem IERS (International Earth rotation and Reference systems Service) wie auch einzelnen Nutzern bereitgestellt. Die Position des IVS-Analysekoordinators wird von Dr. Nothnagel am Geodätischen Institut der Universität Bonn wahrgenommen.

Erwähnt sei in diesem Zusammenhang noch, dass Entscheidungen über Verfahrensschritte und die weitere Entwicklung des IVS durch ein international besetztes IVS-Direktorium getroffen werden (IVS Annual Report 2003, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>).

12 Ausblick

Die Ergebnisse der regelmäßig durchgeführten VLBI-Messungen schlagen sich direkt oder indirekt in vielen Bereichen der Geodäsie, der Positionierung und der Navigation nieder. Viele bedeutende Erkenntnisse können nur mit Hilfe langfristig angelegter Messreihen im Sinne eines globalen Monitoring gewonnen werden. Da all dies in vielen Fällen nicht ganz offensichtlich ist, besteht immer die Gefahr, dass die Infrastruktur, durch die diese Daten gewonnen werden, als selbstverständlich angesehen oder im schlimmsten Fall als unnötig betrachtet wird.

Zu den vordringlichen Zielen für die Zukunft sowohl für den Anwendungs- als auch für den Wissenschafts- und Entwicklungsbereich gehört die kontinuierliche und zeitnahe Bestimmung des Rotationsverhaltens der Erde. Mit einer ununterbrochenen VLBI-Messreihe, die sich vorerst nur mit regelmäßig abwechselnden Netzwerken realisieren lässt, können kurzperiodische und episodische Phänomene detektiert und überwacht werden. Auf internationaler Ebene müssen dafür allerdings die Voraussetzungen im Bereich der Beobachtungsnetzwerke und der Auswertekapazität einschließlich der damit verbundenen Automatisierung geschaffen werden. Die in der Bundesrepublik Deutschland mit der geodätischen VLBI befass-ten Einrichtungen sind für die zukünftigen Herausforderungen sehr gut positioniert: Mit einem ausbaufähigen Korrelator, mit der Entwicklung eines Expertensystems für die automatisierte Auswertung wie auch mit der notwendigen Planung für einen Ersatz des nunmehr zwanzig Jahre alten Radioteleskops Wettzell, das auch weiterhin seine internationale Schlüsselstellung behalten soll.

Prof. Campbell hat fast drei Jahrzehnte die Entwicklung der geodätischen VLBI in Deutschland geprägt und

maßgeblich zu dessen internationaler Spitzenstellung beigetragen. Dabei hat er sowohl die technologische Weiterentwicklung der VLBI wie auch deren wissenschaftliche Nutzung als bedeutendes geodätisches Raumverfahren mit bestimmt. Es ist zu wünschen, dass die geodätische VLBI in diesem Sinne weiter vorangetrieben wird.

Literatur

- Bare, C. C., Clark, B. G., Kellerman, K. I., Cohen, M. H., Jauncey, D. L.: Interferometry experiment with independent local oscillators, *Science* 157, S. 189, 1967.
 Broten, N. W., Legg, T. H., Locke, J. L., McLeish, C. W., Richards, R. S., Chisholm, R. M., Gush, R. M., Yen, J. L., Galt, J. A.: Long Baseline Interferometry: A new technique; *Science* 156, S. 1592, 1967.
 Campbell, J., Witte, B.: Grundlage und geodätische Anwendung der Very Long Baseline Interferometry (VLBI), *ZfV*, 103, S. 10–20, 1978.
 Campbell, J., Nothnagel, A., Schuh, H.: VLBI-Messungen für geodynamische Fragestellungen, *ZfV*, S. 214–227, 1992a.
 Campbell, J., Nothnagel, A., Schuh, H.: Die Radiointerferometrie auf langen Basislinien (VLBI) als geodätisches Messverfahren höchster Genauigkeit, *AVN*, S. 484–502, 1992b.
 Campbell, J., Nothnagel, A.: Bestimmung rezenter Krustenbewegungen im Europäischen VLBI-Netz, *ZfV*, S. 255–263, 1996.
 Campbell, J., Haas, R., Nothnagel, A.: Measurement of Vertical Crustal Motion in Europe by VLBI, TMR Network FMRX-CT96-0071, Scientific Report, ISBN 92-894-0763-8, 2002.
 Hase, H.: Theorie und Praxis globaler Bezugssysteme, Mitteilungen des BKG, Band 13, Frankfurt am Main, 1999.
 IVS Annual Report 2003/NASA/TP-2004-212254, Hanover MD, 2004 (<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>).
 Schneider, M.: Vorwort zum Schwerpunkttheft: Geodätische Raumverfahren, *ZfV*, S. 179 und weitere Beiträge in diesem Heft, 1992.
 Seeger, H., Grünreich, D., Ihde, J., Weichel, B.: Geschichte des Instituts für Angewandte Geodäsie – Abteilung II des DGFI –, DGK, Reihe E, Nr. 26, S. 188, 2002.
 Shapiro, I. I. et al.: Transcontinental baseline and the rotation of the Earth measured by radio interferometry, *Science*, 186, S. 920–922, 1974.
 Witte, B.: Möglichkeiten und derzeitige Grenzen für die geodätische Anwendung von radio-astronomischen Interferenzmessungen bei langen Basen, *AVN*, 78, S. 417–424, 1971.

Anschrift der Autoren

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Axel Nothnagel
 Geodätisches Institut der Universität Bonn
 Nussallee 17, 53115 Bonn
 Tel.: 0228 733574, Fax: 0228 732988
 nothnagel@uni-bonn.de

Dr.-Ing. Wolfgang Schlüter
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 Geodätische Fundamentalstation Wettzell
 Sackenrieder Straße 25, 93444 Kötzting
 Tel.: 09941 6030, Fax: 09941 603222
 wolfgang.schlüter@bkg.bund.de

Univ. Prof. Dr.-Ing. Hermann Seeger, Präsident und Professor a. D.
 Schülzchenstraße 22, 53474 Bad Neuenahr – Ahrweiler
 Tel.: 02641 34351
 hermann.seeger@t-online.de