

Ralf Schmid

Zur Kombination von VLBI und GNSS

München 2009

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**



Zur Kombination von VLBI und GNSS

Vollständiger Abdruck
der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation

von

Dipl.-Ing. Ralf Schmid

München 2009

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München
Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 -1283 /- 1100
e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Magel

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. phil. nat. Urs Hugentobler
2. Univ.-Prof. Dr. phil. nat. Markus Rothacher,
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz

Die Dissertation wurde am 29.07.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 23.03.2009 angenommen.

© 2009 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet, die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Zusammenfassung

Die geodätischen Raumverfahren wie die Satellitennavigationssysteme (GNSS), die Interferometrie auf langen Basislinien (VLBI) oder auch Laserabstandsmessungen zu Satelliten liefern wertvolle Beiträge zur Erforschung des Erdsystems. Je höher die Genauigkeit der einzelnen Verfahren, desto interessanter wird die Kombination derselben, um die jeweiligen Stärken jedes Verfahrens bestmöglich auszunutzen. Im Hinblick auf die Einrichtung eines sog. *Global Geodetic Observing Systems* durch die *International Association of Geodesy* rückt auch die Kombination der unterschiedlichen Verfahren auf Ebene der Beobachtungen immer mehr in den Mittelpunkt. Hierunter versteht man die Verarbeitung der Beobachtungsdaten verschiedener Verfahren mit ein und demselben Programm. Besonders geeignet erscheint dabei eine Kombination der GNSS mit VLBI. Da es sich in beiden Fällen um Mikrowellenverfahren handelt, sind sich beide auf der einen Seite sehr ähnlich, auf der anderen Seite können sie sich hinsichtlich Stationsverteilung, zeitlicher Auflösung und Verfügbarkeit sowie schätzbarer Parameter jedoch hervorragend ergänzen.

Bislang waren nur zwei Softwarepakete in der Lage, sowohl GNSS- als auch VLBI-Beobachtungen zu verarbeiten. Um ein weiteres Auswerteprogramm zur Kombination der beiden Verfahren auf Beobachtungsebene zur Verfügung zu haben, wurde die Verarbeitung von VLBI-Daten in die *Bernese GPS Software* implementiert. Genutzt werden dabei jedoch nicht die rohen Resultate der VLBI-Korrelatoren, sondern bereits vorverarbeitete Daten im *NGS card format*. Trotz stellenweise vereinfachter Modellierung kann mit einem mittleren Gewichtseinheitsfehler von 30–40 ps nach der Ausgleichung der Beobachtungen einzelner VLBI-Sessions bereits nahezu das Niveau bestehender VLBI-Analyseprogramme erreicht werden. Auch Vergleiche der geschätzten Parameter mit den Lösungen unabhängiger Softwarepakete sowie unabhängiger Raumverfahren zeigen eine erfreulich gute Übereinstimmung. Während troposphärische Zenitverzögerungen bzw. Gradienten sowie tägliche Erdrotationsparameter (ERP) nur wenig von den Vergleichslösungen abweichen, stößt die vereinfachte Modellierung, insbesondere der Stationsuhren, beim Schätzen subtäglicher ERP noch an ihre Grenzen. Was die Koordinatenwiederholbarkeit anbelangt, ist die VLBI-Lösung der *Bernese GPS Software* hingegen nur wenig schlechter als entsprechende Referenzlösungen.

Besonders heikel bei der Kombination unterschiedlicher Raumverfahren sind systematische Effekte in den geschätzten Parametern aufgrund von Modellierungsdefiziten. Solange bei der GNSS-Auswertung Phasenzentrumsvariationen auf Seiten der Satellitenantennen vernachlässigt werden, und solange für die Empfangsantennen Phasenzentrumskorrekturen zum Einsatz kommen, die *relativ* zu einer Referenzantenne bestimmt wurden, weisen z.B. all diejenigen Parameter systematische Differenzen im Vergleich zu VLBI auf, die mit der Phasenzentrumsposition korreliert sind. Zu diesen zählen neben den Stationskoordinaten auch die Troposphärenparameter. Abhilfe schaffen hier *absolute* Phasenzentrumsmodelle, bestehend aus den Resultaten von Roboterkalibrierungen für die Empfangsantennen sowie hierzu konsistent geschätzten Korrekturen für die Sendeantennen an Bord der Satelliten. Seit November 2006 verwendet der *International GNSS Service* ein solches Modell zur Erzeugung seiner Produkte, was eine deutliche Reduzierung systematischer Effekte zwischen den GNSS und VLBI bewirkte.

Abstract

Space geodetic techniques such as the global navigation satellite systems (GNSS), very long baseline interferometry (VLBI) or satellite laser ranging (SLR) produce valuable results for exploring the Earth system. With increasing accuracy of the individual techniques their combination becomes more and more important in order to take advantage of the particular strengths of each technique. The installation of a so-called Global Geodetic Observing System by the International Association of Geodesy also brings into the spotlight the combination of the various techniques at the observation level. This means that observation data from different techniques are analyzed with the same software. In this context, a combination of the GNSS and VLBI is of special interest. As both techniques make use of microwaves, they are very similar on the one hand. On the other hand, however, they can perfectly complement each other with regard to the distribution of observing stations, temporal resolution, latency and the parameters to be estimated.

So far, only two software packages were able to analyze both, GNSS and VLBI observations. In order to get an additional tool for the combination of these two techniques at the observation level, the analysis of VLBI data was implemented into the Bernese GPS Software. However, the selected approach does not make use of the raw output data of the VLBI correlator, but of preprocessed data given in the NGS card format. Although a simplified model is still used, e.g., for the station clocks, the a posteriori sigma of unit weight (about 30–40 ps) of the least squares adjustment of the observations of one single VLBI session is comparable to operational VLBI software packages. Comparisons of the estimated parameters with solutions from independent software packages and from independent space geodetic techniques show a good agreement, too. Tropospheric zenith delays and gradients as well as daily Earth rotation parameters (ERP) differ only slightly from the reference solutions. However, the estimation of subdaily ERP reveals problems with the simplified modeling. As regards the coordinate repeatability, the VLBI solution of the Bernese GPS Software is only slightly worse than the reference solutions.

When combining different space geodetic techniques, systematic effects visible in the estimated parameters due to deficiencies in the modeling are a crucial issue. As long as, e.g., phase center variations of the GNSS transmitting antennas are ignored, and as long as receiver antenna phase center corrections stemming from field calibrations *relative* to a reference antenna are used, all the parameters correlated with the phase center position show systematic biases in comparison with VLBI. This is especially true for station coordinates and troposphere parameters. With *absolute* phase center models consisting of robot calibration results for the receiving antennas and consistent corrections for the transmitting antennas on board the satellites estimated from global terrestrial data the situation is much better. Since the International GNSS Service has adopted such an absolute model for the generation of its products in November 2006, systematic effects between the GNSS and VLBI could be considerably reduced.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abstract	4
1. Motivation und Einleitung	7
2. Grundlagen der geodätischen VLBI	11
2.1. VLBI-Beobachtungsgleichung	11
2.2. Einflüsse auf VLBI-Beobachtungen	14
2.2.1. Einflüsse in der Grundgleichung	14
2.2.2. Gravitative und atmosphärische Laufzeitverzögerung	16
2.2.3. Instrumentelle Einflüsse	19
2.2.4. Stationsbewegungen	22
2.2.5. Sonstige Einflüsse	24
2.3. NGS Card Format	24
3. VLBI in der Bernese GPS Software	27
3.1. Format-Konvertierung	27
3.2. Daten-Prozessierung	28
3.3. Erreichbare Genauigkeiten	33
3.3.1. Einfluß implementierter Modelle	33
3.3.2. Schätzung von Stationskoordinaten	34
3.3.3. Zeitliche Auflösung der Parameter	34
3.3.4. CONT02-Residuen	36
3.3.5. INT2-Residuen	37
4. Kombination geodätischer Raumverfahren	39
4.1. Kombination von Zielparametern	40
4.1.1. Technikinterne Bahnkombination des IGS	40
4.1.2. Technikübergreifende EOP-Kombination des IERS	41
4.2. Kombination von Normalgleichungen	41
4.2.1. Normalgleichungen unabhängiger Analysezentren	43
4.2.2. Normalgleichungen eng kooperierender Analysezentren	43
4.2.3. Normalgleichungen unabhängiger Programme eines Analysezentrum	44
4.3. Kombination von Beobachtungen	44
4.3.1. GINS/DYNAMO	45
4.3.2. GEOSAT	46
4.3.3. Bernese GPS Software	46
4.3.4. EPOS-OC	47
4.3.5. Probleme	47
4.4. Global Geodetic Observing System GGOS	48
4.5. Probleme mit systematischen Effekten	49

5. Modellierung des Phasenzentrums der GNSS-Antennen	51
5.1. Empfangsantennen	51
5.1.1. Aufbau	51
5.1.2. Modellierung des Phasenzentrums	52
5.1.3. Kalibrierungsmethoden	53
5.1.4. Vergleiche, Qualität	56
5.1.5. Radomproblematik	58
5.1.6. Spaceborne GNSS antennas	60
5.2. Sendeantennen	60
5.2.1. Aufbau und Funktion	61
5.2.2. Modellierung des Phasenzentrums	63
5.2.3. Zusammenhang mit den Empfangsantennen	65
5.2.4. Probleme beim Schätzen von Satellitenantennenkorrekturen	66
5.2.5. Vergleich verschiedener Lösungen	70
5.2.6. Bestimmung der GNSS-Phasenzentren durch andere geodätische Raumverfahren	83
5.3. Positive Wirkung auf globale GNSS-Parameter	84
5.3.1. Globaler terrestrischer Maßstab und Punktkoordinaten	84
5.3.2. Satellitenbahnen	89
5.3.3. Troposphäre	91
6. Vergleich von GPS- und VLBI-Resultaten	95
6.1. Kampagne CONT02	95
6.2. Grenzen der Beobachtungssessionen	96
6.3. VLBI-Lösungen mit der Bernese GPS Software	97
6.3.1. Troposphäre	97
6.3.2. Stationsuhren	101
6.3.3. Erdorientierungsparameter	103
6.3.4. Stationskoordinaten	105
6.3.5. ΔUT aus INT2-Messungen	105
7. Zusammenfassung und Ausblick	107
A. Beispieldateien	110
A.1. NGS Card File	110
A.2. Bernese Observation File	111
B. Flußdiagramme	112
B.1. Programm FMT0VLBI	112
B.2. Programm GPSEST	114
Literaturverzeichnis	116
Abkürzungsverzeichnis	128
Dank	132
Lebenslauf	133
Hilfreiche Links	134

1. Motivation und Einleitung

In regelmäßigen Abständen wird die Menschheit von verheerenden Naturkatastrophen wie Erdbeben, Wirbelstürmen, Überschwemmungen oder Vulkanausbrüchen heimgesucht. Im Zuge des momentan vorherrschenden Klimawandels scheint die Häufigkeit solcher Ereignisse sogar noch zuzunehmen. Die geodätischen Raumverfahren wie die globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS) oder die Interferometrie auf langen Basislinien (VLBI) können zwar wertvolle Beiträge zur Erforschung dieser Phänomene liefern, nach wie vor haben die Geowissenschaften das komplexe System Erde jedoch nicht ausreichend verstanden, um mögliche Gefahren rechtzeitig und zuverlässig vorhersagen zu können.

Gleichwohl haben die geodätischen Raumverfahren in den letzten Jahrzehnten eine beachtliche Entwicklung durchgemacht und dadurch in vielfacher Hinsicht auch wichtige Grundlagen für eine ganze Reihe verwandter Disziplinen gelegt. Während man beispielsweise zu Beginn der 1970er Jahre die Entfernung zwischen Europa und Nordamerika erst mit einer Genauigkeit von etwa 1 m bestimmen konnte (Herring et al., 1981), lassen sich heute Stationsbewegungen in einem globalen Referenzrahmen mit einem formalen Fehler von etwa 0.3 mm/a ermitteln (Altamimi et al., 2007). Fortschritte in der Modellierung der verschiedenen Beobachtungstechniken waren zunächst dem Wettbewerb zwischen unabhängigen Forschergruppen bzw. Analysezentren zu verdanken, die sich in der Regel mit jeweils einem der Verfahren beschäftigten. Dieser „Wettstreit“ wurde um die Jahrtausendwende in technikspezifischen internationalen Diensten organisiert, welche durch die Berechnung von Kombinationslösungen und entsprechende Vergleiche für eine weitere Optimierung sorgen konnten.

Innerhalb dieser Dienste haben sich die Lösungen der einzelnen Analysezentren einander inzwischen jedoch bereits so stark angenähert, daß der Erkenntnisgewinn aus dem Vergleich verschiedener Lösungen einer bestimmten Technik zunehmend geringer wird. Je besser allerdings Inkonsistenzen innerhalb einer Technik behoben werden können, umso deutlicher treten Diskrepanzen zwischen den unterschiedlichen geodätischen Raumverfahren zutage. Diese systematischen Effekte bieten die Möglichkeit, bislang verborgene Defizite in der Modellierung aufzuspüren, und damit die Chance auf einen weiteren Genauigkeitsgewinn. So ist also der Vergleich der Resultate unterschiedlicher Techniken, zu denen neben den GNSS und VLBI auch Laserabstandsmessungen, Dopplerverfahren, Schwerefeldmissionen und andere zählen, ins Zentrum des Interesses gerückt.

Da jedes der erwähnten Meßverfahren über ganz spezielle Stärken, aber auch Schwächen verfügt, sollten die besten Resultate durch eine kombinierte Auswertung aller Verfahren zu erzielen sein, bei der einerseits jede Technik ihre eigenen Stärken ausspielen kann, und bei der andererseits mögliche Schwächen bestmöglich durch die übrigen Techniken kompensiert werden. Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen Verfahren bieten dabei alle Parameter, die durch mindestens zwei Techniken bestimmt werden können. Sind zwei Beobachtungstechniken an einem Ort vereint, sei es auf einer Beobachtungsstation oder an Bord eines Satelliten, können daneben die Raumvektoren zwischen den entsprechenden Referenzpunkten als zusätzliche Beobachtungen eingeführt werden. Diese lokalen Vermessungen, an die relativ hohe Anforderungen gestellt werden müssen, würden andernfalls ungenutzt bleiben.

Die Komplementarität verschiedener Verfahren sei hier kurz am Beispiel von VLBI und den GNSS erläutert. Da beide Techniken elektromagnetische Strahlung im Mikrowellenbereich nutzen, sind sie in jedem Fall eng miteinander verwandt, was sich in Gemeinsamkeiten bei der atmosphärischen Laufzeitverzögerung äußert. Die Beeinflussung durch die Troposphäre ist für beide Verfahren identisch und die ionosphärische Refraktion wird jeweils durch Messung auf zwei Frequenzen korrigiert. Neben den Troposphärenparametern treten u.a. Korrekturen für die Stationsuhren sowie Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten als weitere gemeinsame Parameter auf. Was den Referenzrahmen betrifft, so ist VLBI in der Lage, den Maßstab des globalen Netzes eindeutig zu definieren, was den GNSS nicht zweifelsfrei gelingt. Aufgrund der teuren Instrumentierung weist das VLBI-Stationsnetz allerdings eine ungünstige Netzgeometrie sowie eine geringe Stationsdichte auf, was wiederum durch Hunderte weltweit verteilter GNSS-Empfänger kompensiert werden kann.

Eine weitere Gruppe gemeinsamer Parameter bilden die Erdorientierungsparameter (EOP). Da die GNSS nicht unterscheiden können zwischen einer Rotation der Satellitenbahnebenen in der einen Richtung und einer Rotation des terrestrischen Stationsnetzes in der entgegengesetzten, sind die Satellitenverfahren nicht in der Lage, die Nutation sowie die an der wahren Erdrotation ausgerichtete Zeitskala UT1 absolut zu bestimmen. Diese Fähigkeit besitzt unter den Raumverfahren allein VLBI, was mit der Verwendung quasi fixer Ziele im raumfesten System zusammenhängt. Da VLBI bislang keinen Dauerbetrieb unterhalten kann, können für die entsprechenden Parameter jedoch keine lückenlosen Zeitreihen hoher Auflösung bereitgestellt werden. Dies gelingt wiederum nur unter

Zuhilfenahme der GNSS, die zwar nur Änderungsraten der Parameter liefern können, diese dafür aber kontinuierlich. Das gegenseitige Ergänzen läßt sich schließlich auch an den beobachteten Zielen veranschaulichen. Die GNSS nutzen Satelliten als Hochziele, über die sich leicht eine Verknüpfung zu anderen Satellitenverfahren herstellen läßt. Während diese sich im Schwerefeld der Erde bewegen, sind die von der VLBI beobachteten Quasare von diesem völlig unabhängig und ermöglichen zudem den Zugang zum inertialen Bezugssystem.

Eine Kombination unabhängiger Meßverfahren ist auf verschiedenen Ebenen möglich. Die einfachste Vorgehensweise, die auch seit langem praktiziert wird, besteht in einer schlichten Mittelung der Zielparameter unterschiedlicher Techniken. Liegen mehrere Parameter vor, können diese allerdings nur isoliert voneinander gemittelt werden, während Korrelationen zwischen den Parametern keine Berücksichtigung mehr finden können. Auch gehorcht z.B. eine gemittelte Satellitenbahn nicht mehr unbedingt den Gesetzen der Physik. Eine deutliche Verbesserung der Situation tritt ein, wenn die Kombination nicht erst auf der Resultatebene, sondern bereits auf der Ebene von Normalgleichungen vorgenommen wird. Ohne weitere Anstrengungen werden hier die Korrelationen zwischen allen Parametern des Gleichungssystems berücksichtigt. Daneben besteht erst auf diesem Kombinationsniveau die Möglichkeit, von der bereits angesprochenen Komplementarität der unabhängigen Meßverfahren zu profitieren sowie lokal gemessene Raumvektoren zwischen den Referenzpunkten unterschiedlicher Techniken als zusätzliche Beobachtungen einzuführen.

Stammen die zu kombinierenden Normalgleichungen aus unterschiedlichen Programmen, die zudem noch von verschiedenen Institutionen betrieben werden, so kann jedoch in der Regel niemand die völlige Konsistenz der verwendeten Fundamentalkonstanten, a priori-Korrekturmodelle und Auswertestrategien sowie der Parametrisierung der Unbekannten garantieren. Dies rückt erst in den Bereich des Möglichen, wenn die Kombination noch früher, also bereits auf dem Niveau der ursprünglichen Beobachtungen ansetzt. Unerheblich ist dabei zunächst, ob die Beobachtungen verschiedener Techniken gemeinsam in einem Programmlauf verarbeitet werden, oder ob mit ein und demselben Programm nacheinander Normalgleichungen für unterschiedliche Techniken erzeugt werden, um diese anschließend zu kombinieren. Unter der Voraussetzung konsistenter Modellierung und Parametrisierung besteht aus mathematischer Sicht im Prinzip kein Unterschied zwischen der Kombination von Beobachtungen und Normalgleichungen.

Die direkte Kombination von unterschiedlichen Beobachtungstypen innerhalb eines Programmdurchlaufs bietet jedoch einige Optionen, die mit Normalgleichungen nicht realisierbar sind. So wäre eine Kombination von epochenweisen Parametern wie z.B. Uhrkorrekturen bzw. kinematischen Koordinaten, die vor der Erzeugung von Normalgleichungen in der Regel eliminiert werden müssen, allein auf diesem Wege möglich. Auch wenn man unterschiedliche Verfahren in der Realität kombinieren würde, z.B. durch die Aufzeichnung von GNSS-Signalen mit Hilfe von VLBI-Teleskopen, kann eine Auswertung der gewonnenen Daten nur gelingen, wenn das dazu verwendete Softwarepaket die unterschiedlichen Techniken beherrscht.

Da alle Softwarepakete zur Auswertung geodätischer Raumverfahren über viele Jahre oder gar Jahrzehnte gewachsen sind und sich auch permanent weiterentwickeln, besteht eine der Schwierigkeiten bei der Integration verschiedener Techniken in ein Paket darin, mit jeder einzelnen Technik im internationalen Vergleich konkurrenzfähig zu sein. Unter den zwölf von Haas (2004) zusammengetragenen VLBI-Analyseprogrammen befinden sich denn auch nur zwei, die neben VLBI auch Beobachtungen anderer Meßverfahren verarbeiten können. Das französische Programm GINS (*Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées*; Bourda et al., 2007) weist jedoch noch Defizite im Hinblick auf die Genauigkeit der GPS- und VLBI-Lösungen auf (Coulot et al., 2007), und vom norwegischen GEOSAT (Andersen, 2000), das nicht frei verfügbar ist, wurde nur wenig über Kombinationslösungen bekannt. Auch im Hinblick auf den Aufbau des sog. *Global Geodetic Observing Systems* (GGOS), das alle geodätischen Meßtechniken unter einem Dach vereinen soll, besteht also nach wie vor erhöhter Bedarf an Programmen, die in der Lage sind, mehrere Techniken zu verarbeiten.

Zielt man auf eine Kombination der GNSS mit VLBI ab, so stellt sich die Frage, ob es sinnvoller ist, die GNSS-Modellierung in ein existierendes VLBI-Auswerteprogramm zu integrieren oder umgekehrt. Solange nicht die rohen Korrelatorergebnisse, sondern bereits vorverarbeitete VLBI-Beobachtungen ausgewertet werden sollen, wie es die meisten der VLBI-Pakete tun, so scheint der umgekehrte Weg mit einem geringeren Arbeitsaufwand verbunden zu sein. Jedenfalls lassen sich die punktförmigen, quasi fixen Ziele der VLBI beispielsweise deutlich leichter modellieren als die Phasenzentren der GNSS-Satelliten, deren Bahn und Ausrichtung man kennen muß. Auch für die relativ aufwendige Lösung von Phasenmehrdeutigkeiten, die im Falle der GNSS u.U. gemeinsam mit den übrigen Parametern geschätzt werden, gibt es bei der Verarbeitung von VLBI-Gruppenlaufzeiten keine direkte Entsprechung. Es treten zwar auch hier Mehrdeutigkeiten auf, die jedoch bereits bei der Vorverarbeitung gelöst werden.

Aufgrund der hohen Komplementarität von VLBI und GNSS, des erhöhten Bedarfes einer gemeinsamen Auswertung sowie der Vorteile einer Vereinigung der beiden Verfahren in einer hochentwickelten GNSS-Software war das Ziel der vorliegenden Arbeit, das VLBI-Beobachtungsmodell in die *Bernese GPS Software* (Dach et al.,

2007) zu integrieren. Dieses seit den 1980er Jahren an der Universität Bern entwickelte Softwarepaket bestimmt das Genauigkeitsniveau innerhalb des International GNSS Service (IGS) entscheidend mit (z.B. Hugentobler et al., 2004), womit die Konkurrenzfähigkeit auf Seiten der GNSS in jedem Fall garantiert ist. Im Hinblick auf die Kombination sämtlicher Raumverfahren ist daneben von Vorteil, daß mit der *Bernese GPS Software* auch bereits Laserabstandsmessungen zu Satelliten verarbeitet werden können (Urschl et al., 2007). Da die Software zudem für umfangreiche Kombinationsstudien genutzt wurde (Thaller, 2008), steht schließlich auch schon sehr viel Funktionalität, zumindest für die Kombination von Normalgleichungen, zur Verfügung.

Einen besonderen Schwerpunkt der Arbeit bildet die ausführliche Beschreibung der Modellierung der GNSS-Phasenzentren, welche stellvertretend für alle systematischen Effekte behandelt werden, die zwischen den unterschiedlichen geodätischen Raumverfahren auftreten können. Solche Fehlereinflüsse erschweren einerseits die Kombination der Verfahren, bieten andererseits jedoch die ideale Gelegenheit, durch Vergleich der Resultate der unterschiedlichen Verfahren eine verbesserte Modellierung der individuellen Meßtechniken zu erzielen. Daß solche Verbesserungen allerdings nicht im Vorbeigehen zu erreichen sind, zeigt der Umfang des entsprechenden Kapitels. Der Ursprung des Problems liegt in einer veränderlichen Position der Antennenphasenzentren an Bord des Satelliten sowie am Empfängerstandort, welche von der Aussende- bzw. Empfangsrichtung des GNSS-Signals abhängig ist.

Bis zum November 2006 wurden zur Korrektur dieser sog. Phasenzentrumsvariationen (PCVs) auf Empfängerseite innerhalb des IGS die Resultate von Feldkalibrierungen relativ zu einer Referenzantenne eingesetzt, welche auf interkontinentalen Basislinien systematische Fehler verursachen (Mader, 1999). Entsprechende Variationen auf Seiten der Satelliten wurden überhaupt nicht berücksichtigt. Absolute PCVs, die nicht abhängig von einer Referenzantenne sind, liefert dagegen z.B. ein in Hannover entwickeltes Verfahren unter Verwendung eines Roboterarmes zum Drehen und Kippen der zu kalibrierenden Antenne (Menge, 2003). Diese Korrekturwerte konnten in globalen Lösungen jedoch erst eingesetzt werden, als konsistente Parameter für die Satellitenantennen verfügbar waren. Die momentan vom IGS genutzten Korrekturwerte wurden in mehrjährigen globalen Lösungen zusammen mit den übrigen relevanten GNSS-Parametern als Unbekannte geschätzt (Schmid et al., 2007).

Entscheidend für die Einführung des absoluten Phasenzentrumsmodells durch den IGS war zum einen die Bestätigung der Modellwerte durch unabhängige Analysezentren und/oder Bestimmungsmethoden, die für Sende- und Empfangsantennen jeweils geliefert werden konnte. Zum anderen hätte sich das absolute Modell aber wohl kaum durchgesetzt, wenn sich im Vergleich zu den bis dahin verwendeten relativen Korrekturen nicht Verbesserungen in den Resultaten globaler GNSS-Lösungen gezeigt hätten. Um dies zu belegen, können einige wenige GNSS-interne Kenngrößen untersucht werden, wie z.B. die Größe der Sprünge in Koordinatenzeitreihen zum Zeitpunkt von Antennenwechseln, die Größe der Sprünge in den Satellitenbahnen an den Tagesgrenzen, die Wiederholbarkeit täglicher Koordinatenschätzungen oder die Abhängigkeit der Stationshöhen von der Elevationsschranke. Die Veränderungen sind hier jedoch zumeist klein. Aussagekräftiger sind in den meisten Fällen Vergleiche mit den Resultaten anderer Raumverfahren, hier vor allem mit denjenigen der VLBI. Werden systematische Differenzen zwischen den GNSS und VLBI kleiner, ist dies ein eindeutiger Hinweis auf eine verbesserte Konsistenz der Modellierung der beiden Verfahren. Verglichen werden können z.B. der globale terrestrische Maßstab, die troposphärische Verzögerung in Zenitrichtung sowie Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert. In Kap. 2 wird zunächst das VLBI-Beobachtungsmodell vorgestellt, gefolgt von einer umfassenden Zusammenstellung sämtlicher Fehlereinflüsse und entsprechender Korrekturterme. Den Abschluß des Kapitels bildet eine Beschreibung des *NGS card formats*, welches vorverarbeitete Beobachtungsdaten enthält und als Ausgangspunkt für die VLBI-Verarbeitung mit Hilfe der *Bernese GPS Software* gewählt wurde. Kap. 3 umfaßt die Konvertierung des Ausgangsformates in ein entsprechendes *Bernese*-Format sowie Details zur Verarbeitung der VLBI-Daten. Bei der Beschreibung der Formatkonvertierung steht im Vordergrund, welche Daten des VLBI-Formats übernommen und an welcher Stelle sie gespeichert werden können, bei der Datenprozessierung geht es im wesentlichen darum, welche Korrekturterme wo im Programm angebracht werden. Schließlich wird anhand vereinfachter Lösungen mit beschränkter Parameteranzahl untersucht, welche Genauigkeit mit der zuvor beschriebenen Implementierung erreicht werden kann.

Kap. 4 versucht einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten zur Kombination unterschiedlicher geodätischer Raumverfahren zu geben. Anhand verschiedener Beispiele werden die Vorzüge der Kombination auf Beobachtungsebene gegenüber der Kombination von Normalgleichungen bzw. Zielparametern herausgearbeitet, dabei aber auch deren Probleme und Schwierigkeiten angesprochen. Während die Beschreibung des GGOS zeigt, daß an der Integration unterschiedlicher Beobachtungstechniken praktisch kein Weg mehr vorbeiführt, schließt das Kapitel mit einer Sammlung systematischer Effekte zwischen den Techniken, die vor der Kombination bereinigt oder durch entsprechende Hilfsparameter aufgefangen werden müssen. Da einige der systematischen Effekte zwischen den GNSS und VLBI mit Defiziten in der Kenntnis der Phasenzentrumsposition der GNSS-Antennen zusammenhängen, widmet sich Kap. 5 dieser Problematik ausführlich, und zwar getrennt nach Sende- und Empfangsantennen. Im Zentrum steht dabei der Umstieg von relativen auf absolute Phasenzentrumskorrekturen für die

Empfangsantennen sowie die Bestimmung dazu konsistenter Korrekturwerte für die Satellitenantennen. Die Gegenüberstellung unterschiedlicher Modelle erlaubt jeweils Rückschlüsse auf deren Genauigkeit, während Vergleiche globaler GNSS-Lösungen unter Verwendung relativer bzw. absoluter Phasenzentrumsmodelle eine Verringerung systematischer Effekte demonstrieren sollen.

In Kap. 6 wird zunächst die kontinuierliche VLBI-Kampagne CONT02 vorgestellt, deren Beobachtungsdaten auch bereits in Kap. 3 verwendet wurden. Da für den Zeitraum dieser Kampagne sowohl VLBI- als auch GPS-Lösungen mit weitgehend identischer Modellierung und Parametrisierung vorliegen (Thaller, 2008), sind umfangreiche Vergleiche der geschätzten Parameter möglich. Zu diesen zählen Troposphären-, Erdrotations- und Uhrenparameter sowie Stationskoordinaten. Ziel der Vergleiche ist es, die Plausibilität der VLBI-Resultate der *Bernese GPS Software* zu überprüfen, mögliche Defizite der Implementierung aufzudecken und vor allem einen Eindruck von der Qualität der Lösungen zu bekommen. In Kap. 7 wird schließlich eine Bewertung der erzielten Ergebnisse vorgenommen sowie ein Überblick über eine Vielzahl von Verbesserungsmöglichkeiten gegeben, die Raum für weitere Arbeiten lassen.

2. Grundlagen der geodätischen VLBI

Die Anfänge der geodätischen Nutzung von Radioteleskopen reichen zurück in die 1960er Jahre, als die Entwicklung hochgenauer Atomuhren den interferometrischen Betrieb räumlich getrennter Teleskope ohne Kabelverbindung erlaubte (Campbell, 1979). Experimente auf interkontinentalen Basislinien von mehreren 1000 km Länge brachten dem Verfahren den Namen „Interferometrie auf langen Basislinien“ (*very long baseline interferometry* VLBI) ein. Die Entwicklung der VLBI erfolgte nahezu zeitgleich durch Forschergruppen aus Kanada (Brotten et al., 1967) bzw. den USA (Bare et al., 1967). Mittlerweile werden alle wissenschaftlichen Aktivitäten im Bereich der geodätischen VLBI durch den *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry* (IVS; Schlüter et al., 2002; Schlüter und Behrend, 2007) koordiniert.

Genutzt wird bei der VLBI die elektromagnetische Strahlung extraterrestrischer Radioquellen bzw. Quasare. Der Begriff „Quasar“ steht dabei für *quasi-stellar radio source*. Diese erscheinen im Bereich des sichtbaren Lichts zwar als nahezu sternförmig, tatsächlich handelt es sich jedoch um Milliarden Lichtjahre entfernte Galaxien, was die von Schmidt (1963) entdeckte Rotverschiebung beweist. Die ungeheuren Energiemengen, die von den Quasaren abgestrahlt werden, lassen sich nur durch die Existenz massereicher schwarzer Löcher erklären (Rees, 1978).

2.1. VLBI-Beobachtungsgleichung

Das Beobachtungsprinzip der VLBI wird in verschiedenen Publikationen beschrieben (z.B. Campbell, 1979; Zeller et al., 1986; Schuh, 1987; Müller, 1991; Tesmer, 2004), wobei das Vorzeichen in der Beobachtungsgleichung jeweils von der Ausrichtung des Basislinienvektors \mathbf{b} (vom Teleskop 1 zum Teleskop 2 oder umgekehrt) sowie des Quellenvektors \mathbf{k} (vom oder zum Quasar) abhängt (Eubanks, 1991; Hase, 1999). Außerdem unterscheiden sich die Definitionen teilweise hinsichtlich der Tatsache, ob das Teleskop, an dem das Quasarsignal als erstes eintrifft, als Station 1 bzw. 2 bezeichnet wird. Das Grundprinzip beruht auf der simultanen Beobachtung einer extraterrestrischen Radioquelle durch zwei oder mehr Teleskope (vgl. Abb. 2.1). Da die Quasare als unendlich weit entfernte Quellen betrachtet werden können, trifft das Quasarsignal als ebene Welle auf die Erde auf, weswegen die Beobachtungsrichtungen für alle Teleskope auf der Erde parallel sind.

Primäre Beobachtungsgröße ist der zeitliche Unterschied (*delay*) τ zwischen der Ankunft des Quasarsignals an den beiden Radioteleskopen, der in einem aufwendigen Korrelationsprozeß aus den an beiden Stationen aufgezeichneten Daten ermittelt werden kann. Für diese Zeitdifferenz gilt folgender vereinfachter Zusammenhang:

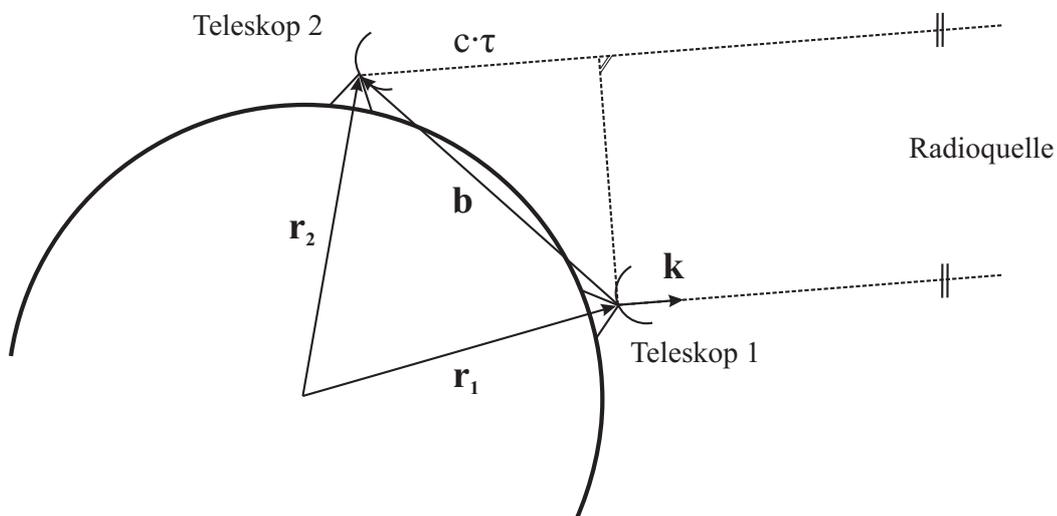


Abb. 2.1.: Beobachtungsprinzip der VLBI.

$$\tau = t_2 - t_1 = -\frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{k}}{c} \quad (2.1)$$

Darin bedeuten t_1 bzw. t_2 die Ankunftszeiten an den jeweiligen Teleskopen, c steht für die Lichtgeschwindigkeit. Der Basislinienvektor \mathbf{b} läßt sich aus den geozentrisch kartesischen Koordinaten $\mathbf{r}_j = (x_j, y_j, z_j)'$ der beiden Beobachtungsstationen berechnen:

$$\mathbf{b} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Der Einheitsvektor in Quasarrichtung \mathbf{k} läßt sich aus der Rektaszension α sowie der Deklination δ des Quasars berechnen, die in einem raumfesten Koordinatensystem gegeben sind (Ma et al., 1998; Gambis, 1999; Fey et al., 2004):

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \delta \\ \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Bevor \mathbf{b} und \mathbf{k} in Gleichung (2.1) multipliziert werden können, müssen die beiden Vektoren noch durch entsprechende Rotationen in ein einheitliches Bezugssystem gebracht werden.

Da die Erde sich nicht in Ruhe befindet, reicht das vereinfachte Modell aus Gleichung (2.1) in der Realität jedoch nicht aus. Die Rotation der Erde um die Sonne sowie die Rotation um die eigene Achse bewirken insbesondere, daß sich die Position von Station 2 noch verändert, nachdem das Quasarsignal bereits Station 1 erreicht hat. Außerdem zeigen z.B. bewegte Uhren ein anderes Verhalten als ruhende. Im Jahre 1991 fand in Washington ein Workshop statt, bei dem eine einheitliche Modellierung der VLBI-Laufzeitdifferenz gefunden werden sollte. Das von Eubanks (1991) veröffentlichte Resultat bildete später die Grundlage für das in den *IERS Conventions* (McCarthy, 1992, 1996; McCarthy und Petit, 2004) enthaltene VLBI-Modell. Berücksichtigt wurden jeweils alle Korrekturterme, die eine Größenordnung von 10^{-13} s übersteigen können, um eine ps-genaue Formulierung zu garantieren.

Da später die Formulierung von Schuh (1987) aufgegriffen wird, soll zunächst deren Konsistenz mit den aktuellen *IERS Conventions* (McCarthy und Petit, 2004) aufgezeigt werden. Unter Vernachlässigung der Laufzeitverzögerung in den Gravitationsfeldern von Sonne, Mond, Erde und der Planeten sowie unter Verwendung eines relativistischen Faktors von $\gamma = 1$ geben McCarthy und Petit (2004) folgende Gleichung für die Laufzeitdifferenz im Vakuum an:

$$\tau_{obs} = \frac{1}{1 + \frac{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2)}{c}} \cdot \left(-\frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \left[1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{\mathbf{v}^2}{2c^2} - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_2}{c^2} \right] - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}}{c^2} \cdot \left[1 + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}}{2c} \right] + \dots \right) \quad (2.4)$$

Darin steht \mathbf{v} für die baryzentrische Geschwindigkeit des Erdmittelpunktes, \mathbf{v}_2 für die geozentrische Geschwindigkeit der zweiten VLBI-Station infolge der Erdrotation und U für das Gravitationspotential der Sonne im Geozentrum. Während die Geschwindigkeit der Erde in Bezug auf das Baryzentrum (Schwerpunkt des Sonnensystems) durch Ephemeriden-Interpolation (z.B. JPL-Ephemeride DE405; Standish, 1998) gewonnen werden kann, läßt sich die geozentrische Geschwindigkeit \mathbf{v}_2 einfach mit Hilfe der Erdrotationsgeschwindigkeit ω_E berechnen:

$$\mathbf{v}_2 = \boldsymbol{\omega}_E \times \mathbf{r}_2 = \begin{pmatrix} -\omega_E \cdot y_2 \\ \omega_E \cdot x_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Zu beachten ist daneben, daß für die Berechnung des Basislinienvektors \mathbf{b} (Gleichung (2.2)) die Stationskoordinaten zum Zeitpunkt t_1 des Signalempfangs am ersten Teleskop zu verwenden sind (bzw. daß die Transformation ins raumfeste System zu diesem Zeitpunkt zu erfolgen hat). Die genaue Definition des Terms, der das Potential U enthält, wurde mehrfach überarbeitet, worauf später noch eingegangen wird. Aus Gleichung (2.4) erhält man unter Verwendung von $(1+x)^{-1} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots$ und durch verschiedene Umformungen mit Ausnahme des Faktors bei U schließlich (Gleichung (2.6)) die Formulierung von Schuh (1987):

Tab. 2.1.: Maximale Größenordnung der Korrekturterme in Gleichung (2.6) für erdgebundene VLBI-Teleskope (Müller, 1991).

Nr.	Term	Maximalwert [s]	Anmerkung
1	$\frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c}$	$2 \cdot 10^{-2}$	vgl. Gleichung (2.1)
2	$\frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})}{c^2}$	$2 \cdot 10^{-6}$	
3	$\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}}{c^2}$	$2 \cdot 10^{-6}$	
4	$\frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)}{c^2}$	$4 \cdot 10^{-8}$	
5	$\frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})^2}{c^3}$	$2 \cdot 10^{-10}$	
6	$\frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}) \cdot 1U}{c^3}$	$2 \cdot 10^{-10}$	siehe unten!
7	$\frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})}{2c^3}$	$1 \cdot 10^{-10}$	
8	$\frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}) \cdot \mathbf{v}^2}{2c^3}$	$1 \cdot 10^{-10}$	
9	$\frac{2(\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)}{c^3}$	$8 \cdot 10^{-12}$	
10	$\frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_2)}{c^3}$	$4 \cdot 10^{-12}$	
11	$\frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)}{c^3}$	$4 \cdot 10^{-12}$	

$$\begin{aligned}
\tau_{obs} &= \left(1 - \frac{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2)}{c} + \frac{(\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2))^2}{c^2} - \dots \right) \cdot \\
&\quad \left(-\frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \left[1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{\mathbf{v}^2}{2c^2} - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_2}{c^2} \right] - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}}{c^2} \cdot \left[1 + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}}{2c} \right] + \dots \right) \\
&= -\frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \frac{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2)}{c} - \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)^2}{c^2} + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \frac{2U}{c^2} + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \frac{\mathbf{v}^2}{2c^2} + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_2}{c^2} - \\
&\quad \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}}{c^2} - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}}{c^2} \cdot \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}}{2c} + \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}}{c^2} \cdot \frac{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2)}{c} + \dots \\
&= -\frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \left(1 - \frac{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2)}{c} + \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})^2 + 2(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2) + (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)^2}{c^2} - \frac{2U}{c^2} - \frac{\mathbf{v}^2}{2c^2} - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_2}{c^2} \right) - \\
&\quad \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}}{c^2} - \frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})}{2c^3} + \frac{2(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})}{2c^3} + \frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)}{c^3} + \dots \\
&= -\frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{b}}{c} \cdot \left(1 - \frac{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2)}{c} + \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})^2 + 2(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)}{c^2} - \frac{2U}{c^2} - \frac{\mathbf{v}^2}{2c^2} - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_2}{c^2} \right) - \\
&\quad \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}}{c^2} + \frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})}{2c^3} + \frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)}{c^3} + \dots
\end{aligned} \tag{2.6}$$

In Zeller et al. (1986) sowie Müller (1991) finden sich Abschätzungen zur Größenordnung der einzelnen Korrekturterme. Diese Maximalwerte finden sich in Tab. 2.1 für alle Terme aus Gleichung (2.6) der Größe nach sortiert. Einer angestrebten Koordinatengenauigkeit von 1 mm würde dabei eine Zeitdifferenz von ca. $3 \cdot 10^{-12}$ s entsprechen. Der größte vernachlässigte Term könnte dagegen maximal eine Größenordnung von $1.5 \cdot 10^{-13}$ s erreichen (Müller, 1991). Die physikalische Bedeutung der Terme aus Tab. 2.1 wird in Kap. 2.2.1 erläutert.

Von Eubanks (1991) wurde der Potentialterm zunächst mit

$$\Delta U = -\frac{(1 + \gamma) \cdot U}{c^2} = -\frac{2U}{c^2} = -2 \cdot \frac{GM_S}{|\mathbf{R}_E| \cdot c^2} \quad (2.7)$$

als Gravitationspotential der Sonne im Erdmittelpunkt definiert. Hierbei steht GM_S für das Produkt aus Gravitationskonstante und Sonnenmasse sowie \mathbf{R}_E für den baryzentrischen Ortsvektor der Erde. Letzteren erhält man wiederum durch Ephemeriden-Interpolation. Vermeintlich um den IAU/IUGG-Resolutionen von 1991 (IUGG, 1992) Genüge zu tun, wurde der Potentialterm in den *IERS Conventions 1996* (McCarthy, 1996) um das Potential der Erde an der Erdoberfläche erweitert: $\Delta U = -2U/c^2 = -2GM_S/|\mathbf{R}_E|/c^2 - 2GM_E/a_E/c^2$ (M_E : Erdmasse, a_E : Äquatorradius). Dadurch sollte der Tatsache Rechnung getragen werden, daß sich die Uhren des VLBI-Systems nicht im Geozentrum, sondern an der Erdoberfläche befinden. Laut Hase (1999) sowie Kopeikin und Petrov (2001) dürfte das Erdpotential jedoch nur mit einem Faktor 1 auftreten:

$$\Delta U = -\frac{2U}{c^2} = -2 \cdot \frac{GM_S}{|\mathbf{R}_E| \cdot c^2} - \frac{GM_E}{a_E \cdot c^2} \quad (2.8)$$

In den *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) wurde dagegen wieder der ursprüngliche Stand von Eubanks (1991) hergestellt, obwohl alle VLBI-Analysezentren die vom Korrelator gelieferten Zeitdifferenzen verarbeiten, ohne diese vorher in eine geozentrische Zeitskala zu transformieren (McCarthy und Petit, 2004). Geschätzte Stationskoordinaten gelten demnach als konsistent mit der *Terrestrial Time* (TT). Die Resultate in der vorliegenden Arbeit wurden ebenfalls unter Verwendung von Gleichung (2.8) ermittelt.

Wie bereits erwähnt, dürfen sämtliche Vektoren in Gleichung (2.6) nur miteinander multipliziert werden, wenn sie im selben System vorliegen. Während die Vektoren \mathbf{b} und \mathbf{v}_2 ursprünglich aus Stationskoordinaten in einem vereinbarten erdfesten System berechnet werden (z.B. ITRF2005; Altamimi et al., 2007), gelten \mathbf{k} und \mathbf{v} zunächst in einem mittleren raumfesten System (z.B. ICRF-Ext. 2; Fey et al., 2004). Für den Übergang vom erdfesten ins inertielle System sind folgende Transformationen notwendig (McCarthy, 1996):

$$\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{N}(t) \cdot \mathbf{R}_3(-\Theta(t)) \cdot \mathbf{R}_1(y_p(t)) \cdot \mathbf{R}_2(x_p(t)) \cdot \mathbf{r}_e(t) = \mathbf{PNUYX} \cdot \mathbf{r}_e(t) \quad (2.9)$$

Mit der Präzession \mathbf{P} sowie der Nutation \mathbf{N} werden dabei die lang- bzw. kurzperiodischen Einflüsse von Sonne, Mond und Planeten auf die Richtung der Erdrotationsachse im Raum berücksichtigt, die wahre Sternzeit Greenwich Θ erlaubt die Korrektur der Erdrotation, und die Polkoordinaten y_p und x_p beschreiben die Position der Drehachse in Bezug auf die Erdoberfläche (vgl. Kap. 2.2.1). Die Vektoren \mathbf{b} und \mathbf{v}_2 beziehen sich also auf hier mit \mathbf{r}_e bezeichnete erdfeste Koordinaten, \mathbf{k} und \mathbf{v} auf mit \mathbf{r}_i bezeichnete raumfeste Koordinaten. In welchem System man die Skalarprodukte aus Gleichung (2.6) berechnet, ist beliebig. Prinzipiell ist jede Zwischenstufe aus Gleichung (2.9) denkbar. Die *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) orientieren sich hinsichtlich der Transformation zwischen erd- und raumfestem System bereits an den IAU-Resolutionen von 2000, die eine veränderte Definition der Erdorientierungsparameter (EOP) vorschreiben. Zentral ist dabei das Konzept eines sog. *Celestial Intermediate Origin* (CIO), der anstatt des Frühlingspunktes zur Definition des Erdrotationswinkels verwendet wird (Kaplan, 2005). Da für die vorliegende Arbeit zwar das Präzessions- und Nutationsmodell IAU 2000A, aber die klassische Transformation verwendet wurde (McCarthy und Petit, 2004), wird hierauf jedoch nicht näher eingegangen.

2.2. Einflüsse auf VLBI-Beobachtungen

Im folgenden soll zunächst die Bedeutung der einzelnen Korrekturterme aus Gleichung (2.6) bzw. Tab. 2.1 erläutert werden (Kap. 2.2.1). Kap. 2.2.2 enthält danach eine Beschreibung der Effekte, die das Quasarsignal auf dem Weg vom Quasar zum Teleskop beeinflussen. Darauf folgen alle Einflüsse, die in irgendeiner Form mit der VLBI-Instrumentierung zusammenhängen, also mit den Teleskopen, den Stationsuhren oder mit dem Korrelator (Kap. 2.2.3). Und Kap. 2.2.4 beschreibt schließlich die Bewegungen, denen eine VLBI-Station im geozentrischen System unterworfen ist.

2.2.1. Einflüsse in der Grundgleichung

Die Korrekturterme der VLBI-Grundgleichung entstehen im wesentlichen durch eine Lorentztransformation zwischen dem quasi unbewegten baryzentrischen System und dem bewegten geozentrischen System. Für die ausführliche Herleitung wird z.B. auf Zeller et al. (1986), Schuh (1987) oder Müller (1991) verwiesen.

Aberration

Aberrationseffekte können immer dann auftreten, wenn sich der Empfänger eines Signals, hier das Radioteleskop, gegenüber dem Sender, also dem Quasar, bewegt. Ein Effekt auf die Raumrichtung, in die das VLBI-Teleskop „blickt“, kann nur dann auftreten, wenn die Bewegungsrichtung des Empfängers nicht mit der Ausbreitungsrichtung des Signals zusammenfällt. Dies ist insbesondere für die Korrektur der atmosphärischen Refraktion (vgl. Kap. 2.2.2) sowie des Achsenoffsets von Bedeutung (Kap. 2.2.3). Bei der Messung der Laufzeitdifferenz wird der Effekt hingegen gerade dann maximal, wenn sich der Empfänger in Signalrichtung bewegt.

Da sich die Erde mitsamt den Teleskopen auf ihrer Oberfläche um die Sonne bewegt und zusätzlich noch um die eigene Achse rotiert, liegen Bewegungen gegenüber dem raumfesten System vor, in dem die Positionen der Quasare definiert sind. Dies bedeutet, daß Teleskop 2 seine Position im Raum noch verändert, nachdem das Quasarsignal bereits Teleskop 1 erreicht hat (vgl. Abb. 2.1). Die gemessene Differenz zwischen den Ankunftszeiten an den beiden Teleskopen wird also um die Wegstrecke verfälscht, um die sich Teleskop 2 in Signalrichtung bewegt, während das Quasarsignal zwischen Station 1 und 2 unterwegs ist.

Die Bewegung um die Sonne wird durch die baryzentrische Geschwindigkeit \mathbf{v} des Erdmittelpunktes beschrieben, die Eigenrotation durch die geozentrische Geschwindigkeit \mathbf{v}_2 der zweiten Station (vgl. Gleichung (2.5)). Der Effekt, den die Bewegung der Erde um die Sonne hervorruft, wird als jährliche Aberration bezeichnet, die durch Terme, die das Skalarprodukt $(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})$ enthalten, korrigiert wird (Zeller et al., 1986). Term 2 aus Tab. 2.1 ist der größte Korrekturterm überhaupt, der an der geometrischen Laufzeitdifferenz aus Gleichung (2.1) angebracht werden muß; die Terme 5, 7 und 9 sind daneben Terme höherer Ordnung. Die Korrektur der Erdrotation wird entsprechend als tägliche Aberration bezeichnet. Diese wird durch Terme, die das Produkt $(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_2)$ enthalten, berücksichtigt (Zeller et al., 1986). Während Term 4 aus Tab. 2.1 in keinem Fall vernachlässigt werden kann, bewegen sich die Korrekturterme höherer Ordnung (Terme 9 und 11) lediglich im mm-Bereich.

Die Abweichung der Beobachtungsrichtung hat keinen Einfluß auf die Laufzeitdifferenz. Sie ist dementsprechend nicht in Gleichung (2.6) enthalten, soll aber dennoch an dieser Stelle angegeben werden, da sie eine Rolle bei der Korrektur der atmosphärischen Refraktion sowie des Achsenoffsets spielt. Mit Hilfe der geozentrischen Geschwindigkeit der j -ten Station \mathbf{v}_j läßt sich die um Aberration verfälschte Beobachtungsrichtung \mathbf{k}_j an der j -ten Station aus dem Quellenvektor \mathbf{k} berechnen (McCarthy und Petit, 2004):

$$\mathbf{k}_j = \mathbf{k} + \frac{\mathbf{v} + \mathbf{v}_j}{c} - \mathbf{k} \cdot \frac{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_j)}{c} \quad (2.10)$$

Uhrensynchronisation

Wie Zeller et al. (1986) aufzeigen, sind zwei Ereignisse, die im baryzentrischen System gleichzeitig stattfinden, im bewegten geozentrischen System nicht notwendigerweise ebenfalls gleichzeitig. Deswegen spielt es eine Rolle, in welchem der beiden Systeme die Stationsuhren an den beiden Enden einer VLBI-Basislinie synchronisiert werden. Da die Herleitung (Zeller et al., 1986) von Gleichung (2.6) auf baryzentrischer Uhrensynchronisation beruht, muß Term 3 aus Tab. 2.1 angebracht werden, da die Uhrensynchronisation tatsächlich im geozentrischen System erfolgt. Dieser Effekt, der maximal wird, wenn \mathbf{v} und \mathbf{b} in dieselbe Richtung zeigen, kann eine ähnliche Größenordnung wie die jährliche Aberration erreichen. Die Terme 7 und 11, die neben Aberrationsanteilen auch das Skalarprodukt $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{b})$ enthalten, repräsentieren die Differenz zwischen baryzentrischem und geozentrischem Basislinienvektor.

Uhrengang

Die verbliebenen Terme 6, 8 und 10 aus Tab. 2.1 liefern den Zusammenhang zwischen baryzentrischer Koordinatenzeit t und der von einer Atomuhr gemessenen Eigenzeit τ' (Moyer, 1981; Müller et al., 2008):

$$d\tau' \approx \left(1 - \frac{U}{c^2} - \frac{\mathbf{v}_A^2}{2c^2} \right) dt \quad (2.11)$$

U ist dabei das Gravitationspotential am Ort der Uhr und \mathbf{v}_A die Geschwindigkeit gegenüber dem raumfesten System, die sich im Falle von VLBI aus der baryzentrischen Geschwindigkeit \mathbf{v} der Erde sowie der Erdrotationsgeschwindigkeit \mathbf{v}_2 zusammensetzt ($\mathbf{v}_A = \mathbf{v} + \mathbf{v}_2$). Die Problematik zu möglichen Vorfaktoren beim Gravitationspotential U bzw. zum Einschluß des Erdpotentials wurde bereits in Kap. 2.1 diskutiert. Differenzen des

Gravitationspotentials aufgrund unterschiedlicher Höhenlage der Stationen können bei ps-Genauigkeit vernachlässigt werden (Müller, 1991). Bei der Abhängigkeit vom Gravitationspotential U handelt es sich um einen *allgemein* relativistischen Effekt, wonach Uhren im Gravitationsfeld langsamer laufen als Uhren, die unbeeinflusst sind von Gravitation. Die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit \mathbf{v}_A hängt dagegen mit der *speziellen* Relativitätstheorie zusammen. Danach laufen bewegte Uhren langsamer als ruhende.

Erdorientierungsparameter

Die Parameter zur Beschreibung von Präzession, Nutation, Tageslängenschwankungen und Polbewegung stecken implizit in der Beobachtungsgleichung, da die auftretenden Vektoren \mathbf{k} , \mathbf{b} , \mathbf{v} und \mathbf{v}_2 vorab in ein einheitliches System transformiert werden müssen (vgl. Gleichung (2.9)). Die Beschreibung an dieser Stelle basiert auf der klassischen Transformation vom erd- ins raumfeste System (McCarthy und Petit, 2004). Zeitreihen der jeweiligen Parameter werden vom IERS aus den Messungen der verschiedenen geodätischen Raumverfahren abgeleitet und bereitgestellt.

Die Präzession entspricht einer säkularen Kreiselbewegung der Erdachse um den Pol der Ekliptikebene, verursacht durch die Gravitationseinflüsse von Sonne, Mond und Planeten auf die abgeplattete Erde, welche äußere Drehmomente bewirken. Sie weist eine Periode von etwa 25800 Jahren auf und läßt sich durch die Präzessionswinkel ζ_A , θ_A und z_A beschreiben (McCarthy und Petit, 2004). Aufgrund von Relativbewegungen der einzelnen Himmelskörper verändern sich die Drehmomente, weswegen das Gesamtdrehmoment zeitlich nicht konstant ist. Dies verursacht Variationen in der Präzession, die sog. Nutation (Hase, 1999). Diese wiederum zeigt eine Hauptperiode von 18.6 Jahren, die von der mittleren Länge des aufsteigenden Mondknotens abhängt. Modelliert wird die Nutation mit Hilfe der Nutation in der Länge $\Delta\psi$ sowie der Nutation in der Schiefe $\Delta\epsilon$.

Beim Übergang vom wahren raumfesten System ins wahre erdfeste wird die Eigenrotation der Erde berücksichtigt. Der Winkel zwischen den jeweiligen x -Achsen in beiden Systemen entspricht dem Winkel des Greenwich-Meridians bezüglich des Frühlingspunktes. Der Bezug zum wahren Frühlingspunkt liefert die *Greenwich Apparent/True Sidereal Time* (GST) Θ . Diese erhält man quasi aus der *Greenwich Mean Sidereal Time* (GMST) durch Berücksichtigung eines Nutationsterms (McCarthy und Petit, 2004; Capitaine et al., 2003). Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Differenz ΔUT zwischen der mittleren Sonnenzeit UT1, die sich an der tatsächlichen Rotation der Erde orientiert, und der gleichmäßig verlaufenden koordinierten Weltzeit UTC, die durch ein Ensemble von Atomuhren auf der Erde realisiert wird. VLBI ist das einzige geodätische Raumverfahren, mit dessen Hilfe ΔUT beobachtet werden kann. Alle übrigen Raumverfahren können lediglich die zeitliche Änderung von ΔUT , die sog. Tageslänge (*length of day*) LOD bestimmen.

Für den Übergang vom wahren in ein vereinbartes erdfestes System muß schließlich noch die Polbewegung berücksichtigt werden, die durch die Polkoordinaten x_p und y_p charakterisiert wird. Während es im Falle von Präzession und Nutation andere Himmelskörper sind, die für äußere Drehmomente sorgen, so sind es hier Massenverlagerungen im Erdsystem, die für eine Variation der Polkoordinaten sorgen. Die nacheiszeitliche Landhebung (vgl. Kap. 2.2.4) könnte beispielsweise die Ursache für eine säkulare Drift des mittleren Rotationspols um ca. 3 mas/a in Richtung des 76° W Meridians sein (Schuh et al., 2001). Die größte Variation des Pols ist jedoch dadurch bedingt, daß die Rotationsachse nicht mit der Hauptträgheitsachse der Erde zusammenfällt. Dies verursacht eine Schwingung mit einer Amplitude von ca. 170 mas und einer Periode von 434 Tagen, der sog. Chandler-Periode. Gross (2000) und Seitz (2004) konnten zeigen, daß die Chandler-Schwingung durch atmosphärische und ozeanische Antriebe angeregt wird.

2.2.2. Gravitative und atmosphärische Laufzeitverzögerung

Laufzeitverzögerung im Gravitationsfeld der Sonne

Entsprechend der allgemeinen Relativitätstheorie werden die Quasarsignale auf ihrem Weg zu den Teleskopen auf der Erde durch den Gravitationseinfluß der Körper unseres Sonnensystems verlangsamt. Die verschiedenen Planeten, unter denen Jupiter den größten Einfluß zeigt, sowie der Mond müssen jedoch nur dann berücksichtigt werden, wenn sich das Quasarsignal vom Teleskop aus gesehen in einem Abstand von weniger als 1°–2° an ihrem Zentrum vorbeibewegt (Schuh, 1987). Keinesfalls vernachlässigt werden kann dagegen der Einfluß der Sonne, der je nach Abstand zum Mittelpunkt zwischen 0.4 und 170 ns betragen kann (Schuh, 1987). Die *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) geben hierfür folgenden Korrekturterm an:

$$\Delta\tau_{\text{grav},S} = \left(1 + \frac{\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2)}{c}\right)^{-1} \cdot \frac{2GM_S}{c^3} \cdot \ln \frac{|\mathbf{X}_1| + \mathbf{k} \cdot \mathbf{X}_1}{|\mathbf{X}_2| + \mathbf{k} \cdot \mathbf{X}_2} \quad (2.12)$$

Darin ist \mathbf{X}_j der heliozentrische Ortsvektor der j -ten Station. Dieser kann aus den baryzentrischen Ortsvektoren der Beobachtungsstation (\mathbf{R}_j) sowie der Sonne (\mathbf{R}_S) ermittelt werden (Hase, 1999):

$$\mathbf{X}_j = \mathbf{R}_j - \mathbf{R}_S \quad (2.13)$$

Die Unterscheidung zwischen helio- und baryzentrischen Stationsvektoren ist insbesondere bei sonnennahen Vorbeigängen von Bedeutung.

Laufzeitverzögerung im Gravitationsfeld der Erde

Bei erdgebundenen Teleskopen durchlaufen die Quasarsignale in jedem Fall auch das Gravitationsfeld der Erde, was sich mit bis zu 21 ps auf die Laufzeitdifferenz auswirken kann und daher berücksichtigt werden muß (Schuh, 1987). Für die Erde können laut den *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) im Vergleich zu Gleichung (2.12) geozentrische Ortsvektoren im raumfesten System verwendet werden:

$$\Delta\tau_{\text{grav},E} = \frac{2GM_E}{c^3} \cdot \ln \frac{|\mathbf{r}_1| + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_2| + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_2} \quad (2.14)$$

Der Vorfaktor in Gleichung (2.12), laut *IERS Conventions 2003* an der Summe aus allen gravitativen Laufzeitverzögerungen anzubringen, braucht für die Erde nicht berücksichtigt zu werden. Mit den Maximalwerten, die Müller (1991) für die Abschätzung der Größenordnungen in Tab. 2.1 verwendete, ergibt sich für den Quotienten $\mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{v}_2)/c$ lediglich ein Wert von $(30 + 0.6)/300000 \approx 1 \cdot 10^{-4}$, der bei einem Maximalwert für $\Delta\tau_{\text{grav},E}$ von 21 ps nicht von Bedeutung ist.

Troposphärische Laufzeitverzögerung

Die Troposphäre, die sich etwa über die untersten 10 km der Atmosphäre erstreckt, ist für Mikrowellen nicht dispersiv. Die troposphärische Signalverzögerung, die demnach für Beobachtungen im S- bzw. X-Band identisch ist, hängt ab vom vorherrschenden Druck (trockener bzw. hydrostatischer Anteil) sowie von der Menge an Wassermolekülen (feuchter Anteil), weil diese ein permanentes Dipolmoment besitzen. Der Einfluß $\Delta\tau_{\text{trp}}$ auf die Laufzeitdifferenz zwischen zwei Teleskopen entspricht der Differenz zwischen den Verzögerungen entlang der Signalwege zu den jeweiligen Stationen (Sovers et al., 1998):

$$\Delta\tau_{\text{trp}} = \Delta t_{\text{trp},2} - \Delta t_{\text{trp},1} = \frac{\Delta\rho_{\text{trp},2} - \Delta\rho_{\text{trp},1}}{c} \quad (2.15)$$

Ist die Verzögerung auf dem Weg zur zweiten Station größer, so muß zu einem im Vakuum modellierten Delay demnach ein Wert $\Delta\tau_{\text{trp}} > 0$ hinzuaddiert werden, um die tatsächliche Beobachtung besser repräsentieren zu können (vgl. Abb. 2.1). Die Verzögerung $\Delta\rho_{\text{trp}}$ hängt maßgeblich ab von der Länge des Signalweges durch die Atmosphäre und damit vom Zenitwinkel z , unter dem ein bestimmter Quasar beobachtet wird. Sie läßt sich als Summe des trockenen (*dry*) und des feuchten (*wet*) Anteiles schreiben (Nothnagel, 2000):

$$\Delta\rho_{\text{trp}}(z) = \Delta\rho_{\text{trp},d}(z) + \Delta\rho_{\text{trp},w}(z) = m_d(z) \cdot \Delta\rho_{\text{trp},d}(0^\circ) + m_w(z) \cdot \Delta\rho_{\text{trp},w}(0^\circ) \quad (2.16)$$

Beide Anteile, sowohl der trockene als auch der feuchte, werden in der Regel als das Produkt aus der Verzögerung in Zenitrichtung $\Delta\rho_{\text{trp}}(z = 0^\circ)$ und einer Umrechnungsfunktion (*mapping function*) $m(z)$ in die entsprechende Beobachtungsrichtung z dargestellt. Zur Berechnung der Verzögerung in Zenitrichtung für einen ganz bestimmten Ort auf der Erde kann man sich einer Vielzahl von Modellen bedienen (z.B. Saastamoinen, 1973), die meteorologische Parameter wie Druck, Temperatur und relative Feuchte als Eingangsgrößen benötigen. Liegen für den Meßzeitpunkt keine meteorologischen Beobachtungen vor, so muß auf eine sog. Standardatmosphäre zurückgegriffen werden. Eine solche besteht aus durchschnittlichen Meteorologiewerten für eine bestimmte Referenzhöhe samt Extrapolationsformeln in den entsprechenden Beobachtungshorizont (z.B. Berg, 1948). Neuerdings steht mit dem sog. GPT-Modell (*global pressure and temperature*) eine Alternative zur Verfügung, die auch jahreszeitliche Schwankungen von Druck und Temperatur berücksichtigt (Boehm et al., 2007).

Aufgrund der hohen örtlichen und zeitlichen Variabilität des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre, kommt man in aller Regel nicht umhin, Troposphärenparameter bei der VLBI-Auswertung mitzubestimmen. Während

das Troposphärenmodell hierfür a priori-Werte liefert, was weniger kritisch ist, gehen die Umrechnungsfunktionen $m(z)$ direkt in die partiellen Ableitungen ein. Daher sind diese seit Jahrzehnten Gegenstand intensiver Forschung. Mendes und Langley (1994) unterscheiden verschiedene biquadratische Ansätze, die sich auf Hopfield (1969) stützen, sowie Modelle mit fortgesetzten Brüchen, die von Marini (1972) entwickelt wurden und mittlerweile am weitesten verbreitet sind. Entscheidende Kenngröße der Umrechnungsfunktionen ist der maximale Zenitwinkel, bis zu dem sie jeweils eingesetzt werden dürfen (Guo und Langley, 2003). Sind Beobachtungen in tiefer Elevation nicht von Interesse, so genügt ein Modell, das allein vom Zenitwinkel abhängt. *Mapping functions*, die auch für tiefe Elevationen gültig sind, hängen zusätzlich von meteorologischen Parametern, von der geographischen Lage der Station und/oder vom Meßzeitpunkt ab (Guo und Langley, 2003). Zusätzliche Parameter erhöhen aber u.U. die Rechenzeit und erzeugen eine Abhängigkeit vom Vorhandensein geeigneter Werte.

Mendes und Langley (2000) konnten zeigen, daß einige der damals gebräuchlichsten Umrechnungsfunktionen auch für tiefe Elevationen nahezu identische Werte lieferten. Die sog. *Niell (1996) Mapping Function* (NMF) wurde aufgrund ihrer Unabhängigkeit von meteorologischen Daten dabei besonders hervorgehoben. Eine Verbesserung dieses Modells, die sog. *Isobaric Mapping Function* (IMF), nutzt ebenfalls Meteorologiewerte, die jedoch einem globalen Wettermodell entnommen werden können (Niell, 2000). Ein globales Raster, zwischen dessen Gitterpunkten interpoliert wird, genügt. Boehm und Schuh (2004) verfolgen stattdessen eine exakte Strahlverfolgung, um die volle Information des Wettermodells zu nutzen. Deren sog. *Vienna Mapping Function* (VMF) wurde mittlerweile noch durch Aufgabe der Symmetrie zum Äquator sowie Berücksichtigung des Meßzeitpunktes verbessert (VMF1; Boehm et al., 2006a). Die *Global Mapping Function* (GMF), die möglichst konsistent zur VMF1 entwickelt wurde, benötigt dieselben Eingabewerte wie die NMF und ist daher leicht zu implementieren (Boehm et al., 2006b).

Die troposphärische Refraktion ist jedoch nicht allein vom Zenitwinkel, sondern auch von der azimutalen Richtung α abhängig. Eine solche Abhängigkeit besteht z.B. dann, wenn Atmosphärenschichten gleichen Brechungsindex bzw. gleichen Wasserdampfgehaltes nicht exakt horizontal ausgerichtet sind. Mathematisch kann dem durch Verkippen der lokalen Zenitrichtung entgegengetreten werden, was sich durch Gradienten der Umrechnungsfunktion in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung beschreiben läßt (Meindl et al., 2004). Dies ergibt zusätzliche Korrekturterme, die zu Gleichung (2.16) hinzuaddiert werden müssen:

$$\Delta\rho_{\text{trp}}(z, \alpha) = \Delta\rho_{\text{trp}}(z) + \frac{\partial m}{\partial z} \cdot \cos \alpha \cdot \Delta\rho_n + \frac{\partial m}{\partial z} \cdot \sin \alpha \cdot \Delta\rho_e \quad (2.17)$$

$\Delta\rho_n$ und $\Delta\rho_e$ sind dabei die Komponenten des Gradientenvektors in Nord- bzw. Ost-Richtung (Nothnagel, 2000). Die *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) empfehlen, $(m \cdot \tan z)$ für $\partial m / \partial z$ zu verwenden. Dies ergibt sich aus der Ableitung des dominierenden Termes der Umrechnungsfunktionen ($m(z) \approx 1 / \cos z$).

Ionosphärische Laufzeitverzögerung

Unter der Ionosphäre versteht man den Teil der Erdatmosphäre, in dem elektromagnetische Wellen von geladenen Teilchen (Ionen und freie Elektronen) beeinflusst werden. Sie erstreckt sich von etwa 60 bis 1000 km Höhe (Heise, 2002). Da die Freisetzung von Elektronen von der Ultraviolett- und Röntgenstrahlung der Sonne angeregt wird, hängt der Elektronengehalt der Ionosphäre im wesentlichen von der Ausrichtung zur Sonne bzw. vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlung ab. Aufgrund dessen zeigen sich u.a. tägliche (Rotation der Erde), 27-tägige (Rotation der Sonne) sowie saisonale Perioden. Dominiert werden diese jedoch vom 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus, in dem die Anzahl der Sonnenflecken schwankt, an denen überdurchschnittlich viel Energie von der Sonne abgegeben wird.

Da die Ionosphäre im Frequenzbereich der Mikrowellen dispersiv ist, Beobachtungen im S- ($f_S \approx 2.3$ GHz) bzw. X-Band ($f_X \approx 8.4$ GHz) also unterschiedlich stark beeinflusst werden, kann aus den Beobachtungen τ auf zwei Frequenzen eine Korrektur der ionosphärischen Refraktion abgeleitet werden (Schuh, 1987):

$$\Delta\tau_{\text{ion},X} = \frac{f_S^2}{f_X^2 - f_S^2} \cdot (\tau_X - \tau_S) \quad (2.18)$$

Dieser Korrekturterm ist an der X-Band-Beobachtung anzubringen (vgl. Kap. 3.1), welche die eigentliche geodätische VLBI-Beobachtung darstellt. Die Aufzeichnung von Signalen im S-Band dient im wesentlichen der Bestimmung der ionosphärischen Korrektur (Tesmer, 2004). Da im S-Band aufgrund der zunehmenden Zahl künstlicher Signalquellen vermehrt Interferenzen auftreten, gibt es Überlegungen, auf andere Radarbänder auszuweichen. Um die ionosphärische Refraktion weiterhin korrigieren zu können, muß dabei allerdings auf einen ausreichenden Abstand zum X-Band geachtet werden (Petrachenko et al., 2004).

Bei der Anwendung von Gleichung (2.18) werden einige Sekundäreffekte vernachlässigt, die Herring (1983) in der Summe mit maximal 3 ps abschätzt. Ein größeres Problem stellen dagegen die sog. Szintillationen dar, welche durch Streuung und Brechung einer elektromagnetischen Welle an kleinräumigen Irregularitäten der Elektronendichte hervorgerufen werden (Heise, 2002). Solche treten besonders häufig in hohen Breiten sowie in den Abendstunden im äquatorialen Bereich auf. Herring (1983) schätzt für die 1.24 km lange Basislinie Haystack–Westford einen maximalen Fehler von ± 12 ps ab, was über der heutigen Meßgenauigkeit von VLBI liegt.

2.2.3. Instrumentelle Einflüsse

Achsenoffsets

Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Konstruktionsformen von VLBI-Teleskopen samt Skizzen liefert Hase (1999). Die meisten geodätisch genutzten Teleskope sind Zweiachssysteme, da diese über Vorteile in Bezug auf die Lagestabilität des Bezugspunktes verfügen, der sich idealerweise im Schnittpunkt der beiden Achsen befindet. Aufgrund der Größe der Instrumente konnte ein solcher Schnittpunkt jedoch nicht immer fehlerfrei realisiert werden, was sich in windschiefen Rotationsachsen äußert, deren kürzester Abstand als Achsenoffset (*axis offset*) bezeichnet wird. Wie die Achsenoffset-Datei¹ des IVS-Analysekoordinators zeigt, wurde ein Achsenoffset bei vielen Teleskopen konstruktionsbedingt bewußt in Kauf genommen. So weist beispielsweise ein mittlerweile stillgelegtes Teleskop in Green Bank (West Virginia) einen Achsenoffset von knapp 15 m auf.

Bei der Korrektur des Achsenoffsets muß nach verschiedenen Konstruktionsformen für zweiachsige Teleskope unterschieden werden. Im wesentlichen treten drei unterschiedliche Montierungstypen auf:

- Äquatoriale Montierung (*equatorial mount* EQUA bzw. *hour angle/declination mount* HADEC): Eine der beiden Achsen, die sog. Polarachse, steht hier parallel zur Erdrotationsachse. Dadurch ist die Nachführung des Teleskops während der Beobachtung eines Quasars allein durch Drehung um diese Achse möglich. Um die zweite Achse (sog. Deklinationsachse) muß nur beim Anfahren einer neuen Quelle gedreht werden. Ein Achsenoffset ist hier konstruktionsbedingt unvermeidlich.
- Altazimut-Montierung (*altazimuth mount* bzw. *azimuth/elevation mount* AZEL): Bei dieser Montierung unterscheidet man zwischen der lotrecht stehenden Azimutachse und der senkrecht dazu angeordneten Elevationsachse, die sich idealerweise in einem Punkt schneiden.
- XY-Montierung (*X-Y mount*): Über der horizontal angeordneten Primärachse befindet sich die senkrecht verlaufende Sekundärachse. Je nachdem, ob die Primärachse nach Norden oder Osten zeigt, spricht man von einer XY-Montierung in Nord-Süd- (X-YN) bzw. Ost-West-Ausrichtung (X-YE). Ein Achsenoffset läßt sich auch hier konstruktionsbedingt nicht vermeiden.

Trotz der unterschiedlichen Ansätze, besteht eine enge Verwandtschaft zwischen den drei Konstruktionsformen. Eine äquatoriale Montierung ließe sich nämlich bei Aufstellung am Pol in eine Altazimut-Montierung und bei Aufstellung am Äquator in eine XY-Montierung in Nord-Süd-Ausrichtung überführen (Hase, 1999).

Sovers et al. (1998) geben ein einfaches Modell für die Korrektur des Achsenoffsets L an, den kürzesten Abstand zwischen den beiden Teleskopachsen. Abb. 2.2 veranschaulicht diesen am Beispiel der Altazimut-Montierung. Theoretisch wären alle Punkte auf der Azimutachse als Referenzpunkte geeignet, da sie ihre Lage relativ zur Erdoberfläche nicht verändern. Als Bezugspunkt P des VLBI-Teleskops wird jedoch derjenige Punkt definiert, in dem sich die Azimutachse sowie eine Ebene, welche die Elevationsachse enthält, senkrecht schneiden bzw. der den kürzesten Abstand von der Elevationsachse aufweist.

Der Achsenoffset-Vektor \mathbf{L} zeigt dabei vom Bezugspunkt P zur Elevationsachse. Entscheidend für die Laufzeitmessung ist jedoch nur die Projektion l des Offset-Vektors \mathbf{L} auf die Beobachtungsrichtung \mathbf{k}_j , die mit Hilfe von Gleichung (2.10) vorab wegen Aberration korrigiert werden muß. Diese ließe sich einfach durch das Skalarprodukt aus \mathbf{k}_j und \mathbf{L} berechnen. Da vom IVS jedoch nur der Betrag L des Achsenoffsets angegeben wird, muß man auf folgende Beziehung ausweichen, die zusätzlich die Richtung \mathbf{I} der ersten Rotationsachse enthält (Sovers et al., 1998):

$$l = \pm L \cdot \sqrt{1 - (\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{I})^2} \quad (2.19)$$

Das positive Vorzeichen gilt dann, wenn sich bei zunehmendem L der Abstand zwischen Teleskop und Quasar verringert. Der Richtungsvektor \mathbf{I} der ersten Achse des Teleskops wird zunächst im erdfesten System definiert,

¹<http://vlbi.geod.uni-bonn.de/IVS-AC/data/axis-offsets.txt>

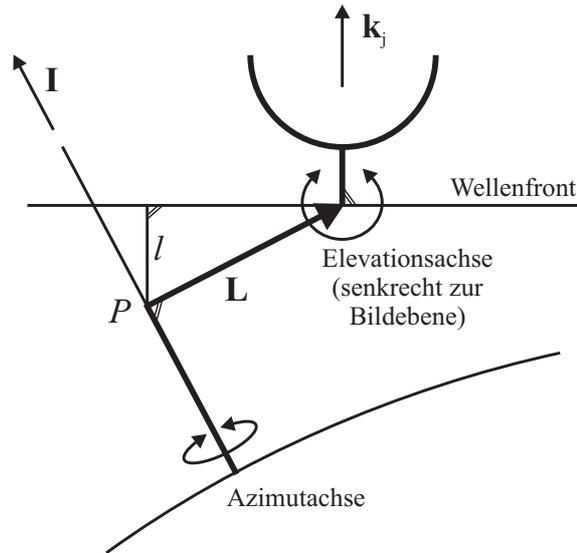


Abb. 2.2.: Achsenoffset \mathbf{L} zwischen der Elevationsachse und dem Bezugspunkt P auf der Azimutachse am Beispiel einer Altazimut-Montierung (Sovers et al., 1998).

muß jedoch vor der Multiplikation mit \mathbf{k}_j ins entsprechende System transformiert werden (vgl. Kap. 2.1). Zudem hängt die Richtung der Achse ganz entscheidend vom Montierungstyp ab. Im Falle einer äquatorialen Montierung zeigt die Polarachse zum nördlichen bzw. südlichen Himmelspol, je nachdem, ob sich die Station auf der nördlichen oder südlichen Halbkugel befindet:

$$\mathbf{I}_{\text{EQUA}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Bei einer Altazimut-Montierung wie in Abb. 2.2 zeigt die Azimutachse zum Zenit, weshalb deren Richtung in Abhängigkeit der Breite ϕ sowie der Länge λ der Station beschrieben werden kann:

$$\mathbf{I}_{\text{AZEL}} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ \cos \phi \cdot \sin \lambda \\ \sin \phi \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Bei einer XY-Montierung in Nord-Süd-Ausrichtung zeigt die Primärachse in nördlicher Richtung zum Horizont:

$$\mathbf{I}_{\text{X-YN}} = \begin{pmatrix} -\sin \phi \cdot \cos \lambda \\ -\sin \phi \cdot \sin \lambda \\ \cos \phi \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Bei einer XY-Montierung in Ost-West-Ausrichtung zeigt die Primärachse dagegen in östlicher Richtung zum Horizont, weswegen \mathbf{I} allein in Abhängigkeit der Länge λ beschrieben werden kann:

$$\mathbf{I}_{\text{X-YE}} = \begin{pmatrix} -\sin \lambda \\ \cos \lambda \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Zur Verdeutlichung der Verwandtschaft der drei Montierungstypen sei angemerkt, daß sich für eine Altazimut-Montierung am Pol ($\mathbf{I}_{\text{AZEL}}(\phi = \pm 90^\circ, \lambda = 0^\circ) = (0, 0, \pm 1)'$) bzw. für eine XY-Montierung in Nord-Süd-Ausrichtung am Äquator ($\mathbf{I}_{\text{X-YN}}(\phi = 0^\circ, \lambda = 0^\circ) = (0, 0, 1)'$) jeweils der Richtungsvektor einer äquatorialen Montierung ergeben (vgl. Gleichung (2.20)).

Eine aus den Koordinaten der Referenzpunkte zweier VLBI-Teleskope modellierte Zeitdifferenz muß schließlich um folgenden Term korrigiert werden:

$$\Delta\tau_{\text{axoff}} = \frac{l_1 - l_2}{c} \quad (2.24)$$

Ist der Einfluß des Achsenoffsets an beiden Teleskopen gleich, hat dies keinen Einfluß auf die gemessene Zeitdifferenz. Ist er dagegen am ersten Teleskop größer ($l_1 > l_2$), so ist die gemessene Zeitdifferenz größer als die aus den Koordinaten der Referenzpunkte berechnete.

Phasen- und Kabelkalibrierung

Die Mikrowellensignale im X- bzw. S-Band durchlaufen auf dem Weg von der Antenne zum Recorder mehrere Verbindungskabel und verschiedene elektronische Bauteile, welche die Signale beeinflussen. Da diese Signalveränderungen frequenzabhängig sind, können Teile des aufgezeichneten Spektrums Phasenverschiebungen oder Amplitudenänderungen unterworfen sein (Tesmer, 2004). Um solche Effekte zu korrigieren, wird ein Signal bekannter Phase in den VLBI-Signalweg eingespeist und hinterher im Korrelator zusammen mit den Quasarsignalen ausgewertet (Sovers et al., 1998; Hase, 1999). Gelingt die Korrektur der einzelnen Frequenzkanäle, werden die entsprechenden Verbesserungen offenbar direkt an den vom Korrelator ermittelten Laufzeitdifferenzen angebracht.

Das einzige Kabel, dessen Längenänderung infolge von Temperaturschwankungen nicht durch das obige Phasenkalibriersystem erfaßt werden kann, ist dasjenige, welches den Referenzimpuls vom Zeitsystem zum Erregerhorn schickt (Schuh, 1987). Aus diesem Grund ist zusätzlich ein sog. Kabelkalibriersystem notwendig, das auf der Reflexion eines Signals von der Antenne zurück zum Zeitsystem beruht (Hase, 1999). Die ermittelten Korrekturwerte werden nicht direkt an der Zeitdifferenz angebracht, sondern gesondert bereitgestellt (vgl. Kap. 2.3). Die Längenänderungen des Kabels können sich mit mehreren 100 ps auf die Laufzeit auswirken, wobei systematische langwellige Anteile problemlos durch das Schätzen von Uhrparametern kompensiert werden können.

Teleskopdeformationen

Aufgrund ihrer Dimensionen sind VLBI-Teleskope anfällig für verschiedene Arten von Deformationen. Abgesehen von wenigen Teleskopen, die von einem Radom geschützt werden, sind VLBI-Teleskope zunächst den jahreszeitlichen und täglichen Schwankungen der Umgebungstemperatur voll ausgesetzt. Für diese sog. thermische Deformation enthalten die *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) im Kapitel „*Displacement of reference points*“ ein Korrekturmodell, das im wesentlichen auf temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten beruht. Dieses Modell liefert Korrekturwerte von bis zu mehreren ps für die Laufzeitdifferenz in Abhängigkeit des Elevationswinkels. Neben der gleichmäßigen Erwärmung der gesamten Konstruktion spielt auch die einseitige Sonnenbestrahlung eine Rolle, die jedoch weitaus schwieriger zu modellieren ist.

Ein weiterer meßbarer Effekt ist die Verformung der Teleskopkonstruktion aufgrund der Schwerkraft (*gravitational deformation/sag*). Wäre das Teleskop immer gleich ausgerichtet, so hätte man es lediglich mit einer permanenten Verformung zu tun. Aufgrund der Notwendigkeit, das Teleskop in Richtung des Quasars auszurichten, verändert sich dessen Form im Prinzip jedoch bei jeder neuen Beobachtung. Dawson et al. (2005) konnten durch Überwachungsmessungen am Teleskop von Hobart (Australien) eine maximale Änderung der Distanz zwischen Empfänger und Referenzpunkt von 2 mm feststellen. Montaguti et al. (2007) beobachteten die Teleskope in Medicina und Noto (Italien) mit Hilfe eines Laserscanners. Beim Schwenken der Teleskope von 90° auf 15° Elevation verformten sich die Antennen in dem Maße, daß sich die Brennweite eines ausgleichenden Paraboloids um 2–3 cm veränderte. Welchen Einfluß dies auf den Signalweg hat, muß allerdings erst noch untersucht werden.

Sammeln sich zusätzliche Massen in Form von Schnee und Eis auf dem Teleskop, kann dies natürlich entsprechende Auswirkungen haben (Schuh, 1987). Da diese Effekte zeitlich veränderlich sind, ist hier im Gegensatz zur Verformung aufgrund des Eigengewichts allerdings eine Korrektur kaum möglich. Ähnlich verhält es sich mit dem Einfluß des Windes, der bei entsprechender Teleskopausrichtung spürbare Verformungen verursachen könnte.

Uhrenverhalten

Die eigentliche VLBI-Beobachtung, die Laufzeitdifferenz, entsteht durch Korrelation der auf zwei Stationen aufgezeichneten Signale, die mit Zeitmarken hochgenauer Frequenznormale, zumeist Wasserstoff-Maser, versehen sind. Diese weisen derzeit eine Stabilität von ca. 10^{-15} auf (Niell et al., 2005). Die Synchronisation zwischen den verschiedenen VLBI-Stationen gelingt mit Hilfe von GPS-Zeitempfängern momentan allerdings nur auf ca. 0.1 ps genau (Tesmer, 2004). Da die Differenz zwischen den Ankunftszeiten an zwei Teleskopen hingegen ps-genau gemessen und modelliert werden kann (vgl. Kap. 2.1), muß der Synchronisationsfehler naturgemäß als Unbekannte

mitbestimmt werden. Im Falle eines Netzes von VLBI-Stationen wird das Frequenznormal eines Teleskops als Referenzuhr definiert, um dann die Offsets aller übrigen Uhren gegenüber dieser Referenzuhr zu schätzen.

Schwieriger in den Griff zu bekommen sind Instabilitäten und Sprünge der Frequenznormale während einer VLBI-Session. Sovers et al. (1998) empfehlen die Schätzung einer quadratischen Uhrkorrektur, wobei der lineare Anteil in vielen Fällen ausreichend sei. Der Term nullter Ordnung entspricht dabei dem Synchronisationsfehler:

$$\Delta\tau_{\text{clk}} = a + b \cdot (t - t_0) + \frac{c}{2} \cdot (t - t_0)^2 \quad (2.25)$$

Auch die Terme erster und zweiter Ordnung werden relativ zur Referenzuhr geschätzt. Treten Sprünge auf, können mehrere quadratische Funktionen pro Session angesetzt werden (Tesmer, 2004).

Korrelationsfehler

Ebenfalls zur VLBI-Hardware zählen die Korrelatoren, welche die von jeweils zwei Stationen aufgezeichneten Quasarsignale gegeneinander verschieben, um dadurch die bestmögliche Übereinstimmung herausfinden und den Unterschied in der Ankunftszeit ermitteln zu können. Eine detaillierte Beschreibung der hierfür notwendigen Schritte liefert beispielsweise Whitney (2000). Korrelatoren befinden sich u.a. in Bonn, Haystack und Washington.

Laut Schuh (1987) trägt auch der Korrelationsvorgang zum VLBI-Fehlerbudget bei. Fehler können einerseits durch Unregelmäßigkeiten der Hardware bedingt sein, andererseits könnten sich auch Näherungen bei der Software-Implementierung bzw. Rundungsfehler negativ auswirken.

2.2.4. Stationsbewegungen

Unter dem Begriff „Stationsbewegungen“ versteht man alle Einflüsse auf die Stationskoordinaten im erdfesten System. Diesen ist in den *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) das Kapitel „Displacement of reference points“ gewidmet.

Plattentektonik

Die Erdkruste besteht aus tektonischen Platten verschiedener Größe, die aufgrund von Konvektionsströmungen im Erdmantel in Bewegung sind. Die Bewegung einer einzelnen Platte läßt sich als Rotation beschreiben, was bedeutet, daß durch Angabe eines Rotationsvektors sowohl Rotationspol als auch -geschwindigkeit festgelegt werden können. Man unterscheidet Modelle, die sich zur Festlegung dieser Vektoren nur auf geophysikalische Beobachtungen (z.B. Spreizungsrate des Ozeanbodens an mittelozeanischen Rücken, Ausrichtung von Transform-Störungen, wo sich Platten horizontal aneinander vorbeischieben, Richtungen von Erdbebenverwerfungen) stützen, und solche, denen geodätische Beobachtungen zugrunde liegen. Unterschiede bestehen auch hinsichtlich der Anzahl der Platten. Während das Modell NUVEL-1 (DeMets et al., 1990) die Erdoberfläche in 14 große bis mittelgroße tektonische Platten unterteilt, führt Bird (2003) zusätzlich 38 kleinere Platten auf. Beobachtungsstationen auf den Platten verändern ihre Lage im erdfesten Bezugsrahmen infolge der Plattentektonik um einige cm/a, worin der größte Teil der Stationsgeschwindigkeiten im ITRF besteht (Altamimi et al., 2002).

Das geophysikalisch bestimmte Modell NUVEL-1 bzw. das verbesserte NUVEL-1A (DeMets et al., 1994) geben Rotationsgeschwindigkeiten relativ zur pazifischen Platte an, um eine Singularität zu vermeiden. Eine Alternative zur Fixierung einer bestimmten Platte besteht in der Verwendung einer sog. *No-Net-Rotation*-Bedingung, wonach die Summe über alle Bewegungen auf der Erdoberfläche Null sein soll. Die entsprechenden Modelle heißen NNR-NUVEL-1 bzw. NNR-NUVEL-1A. Ebenfalls auf geophysikalischen Beobachtungen beruht das Modell PB2002 von Bird (2003). Die Vielzahl relativ kleiner Platten, die in diesem Modell enthalten sind, befinden sich jeweils in den Grenzgebieten der größeren Platten. Allein auf Beobachtungen der geodätischen Raumverfahren beruht im Gegensatz dazu das Modell APKIM2005 (*Actual Plate Kinematic Model*; Drewes, 2006). Zwangsläufig können solche Modelle nur Platten erfassen, auf denen sich auch Beobachtungsstationen befinden. Obwohl geodätische Beobachtungsdaten erst für wenige Jahrzehnte vorliegen, stimmen diese Modelle sehr gut mit geophysikalischen Modellen überein, deren Daten auf Prozessen von Jahrtausenden beruhen.

Gezeiteneffekte

Die Gravitationskräfte der großen Massen unseres Sonnensystems (Mond, Sonne, Planeten) haben nicht nur einen Einfluß auf die Meeresoberflächen, sondern auch auf den festen Erdkörper. Aufgrund ihres verhältnismäßig großen Abstandes von der Erde, kann der Einfluß der Planeten jedoch vernachlässigt werden (Tesmer, 2004). Da die Erde nicht völlig starr ist, verformt sie sich unter dem Einfluß von Sonne und Mond, was als Gezeiten der festen Erde (*solid Earth tides*) bezeichnet wird. Die Elastizitätseigenschaften der Erde lassen sich durch die Love'schen Zahlen h_{nm} und die Shida'schen Zahlen l_{nm} beschreiben (McCarthy und Petit, 2004). Diese sind sowohl abhängig von der geographischen Breite als auch von der Frequenz (Wahr, 1981). Die Breitenabhängigkeit hängt im wesentlichen mit der Abplattung der Erde zusammen, die Frequenzabhängigkeit ist u.a. durch die freie Nutation aufgrund des Erdkerns (*free core nutation*) sowie die Anelastizität des Erdmantels bedingt (McCarthy und Petit, 2004). Diejenigen Effekte, die für die Frequenzabhängigkeit sorgen, verursachen auch zeitliche Verzögerungen zwischen dem gezeitenerzeugenden Potential und der eigentlichen Deformation. Das vollständige Modell ist in den *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) enthalten. Die Gezeiten der festen Erde können sich mit bis zu 40 cm auf die Höhe von Beobachtungsstationen auswirken (Watson et al., 2006). Horizontale Deformationen betragen etwa 10% der vertikalen Punktverschiebung (Tesmer, 2004).

Ein indirekter Gezeiteneffekt entsteht durch die Veränderung der Stellung der Erdachse infolge der Polbewegung (vgl. Kap. 2.2.1). Verlagert sich die Achse, so verändert sich das Zentrifugalpotential. Die hierdurch verursachten Stationsbewegungen nennt man Polgezeiten (*pole tide*), für die ebenfalls ein Modell in den *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) enthalten ist. Koordinatenänderungen von wenigen cm sind möglich.

Auflasteffekte

Im Grunde genommen handelt es sich auch bei der Ozeanauflast (*ocean loading*) um einen indirekten Gezeiteneffekt. Da durch die Ozeantiden gewaltige Wassermassen verlagert werden, wirkt sich dies auch auf die darunterliegenden tektonischen Platten aus. Bei Flut werden die Platten nach unten gedrückt, bei Ebbe sorgt die Entlastung für eine Anhebung der Platte. Der Effekt ist für küstennahe Stationen zwar am größten, er wirkt sich jedoch noch weit bis ins Landesinnere spürbar aus. Die *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) sehen vor, daß die elf dominierenden Gezeitenperioden berücksichtigt werden, deren Amplituden und Phasen einem Ozeangezeitenmodell entnommen werden können (z.B. FES2004; Letellier, 2004). Mit Hilfe dieser Daten lassen sich die Amplituden und Phasen der Koordinatenänderungen in allen Raumrichtungen an einem bestimmten Ort berechnen, die in einem Umkreis von ca. 10 km ausreichende Genauigkeit aufweisen. Für küstennahe Stationen ist zusätzlich ein hochaufgelöstes Modell der Küstenlinie erforderlich. Zur Berechnung der Koordinatenänderungen kann man sich u.a. eines Programms² des *Onsala Space Observatory* bedienen. An Küsten mit großem Tidenhub kann die vertikale Position einer Station um bis zu 12 cm variieren (Tesmer, 2004).

Verändern sich Stationspositionen infolge von Luftdruckänderungen, genauer gesagt infolge von Massenverlagerungen innerhalb der Atmosphäre, so spricht man vom Effekt der Atmosphärenauflast (*atmospheric loading*). Während in vertikaler Richtung Verschiebungen von maximal 2.5 cm auftreten können, beträgt die horizontale Deformation höchstens etwa ein Drittel dieses Wertes (McCarthy und Petit, 2004). Am geringsten sind die Einflüsse der Atmosphäre in mittleren Breiten, wo offensichtlich relativ stabile Druckverhältnisse vorherrschen, sowie in Küstennähe, wo das Meer durch Ausgleichsbewegungen von Wassermassen den Effekt abmildern kann. Eine Modellierung der Atmosphärenauflast ist schwierig. Eine Möglichkeit besteht darin, die globale Druckverteilung zu berücksichtigen (z.B. Petrov und Boy, 2004), eine weitere liefert einfache stationsspezifische Korrekturkoeffizienten durch den Vergleich lokaler Druckverhältnisse mit möglichst langen Koordinatenzeitreihen (z.B. Kaniuth und Vetter, 2006). Seit dem Jahre 2002 arbeitet das *Special Bureau for Loading*³ (SBL) des IERS daran, Werte zur Korrektur der Atmosphärenauflast bereitzustellen.

Auflasteffekte infolge von Grundwasser, Bodenfeuchte bzw. Schnee sind relativ klein und vor allem schwierig zu modellieren. Sie werden daher bislang kaum berücksichtigt, das SBL soll aber auch deren Erforschung vorantreiben. van Dam et al. (2001) berichten, daß Veränderungen im kontinentalen Wasserhaushalt Stationshöhenänderungen von bis zu 3 cm bewirken können, und laut Dill (2002) verursacht eine großflächige Schneehöhe von 1 m immerhin noch eine vertikale Deformation von etwa 4 mm.

Sonstige Effekte

Bei der nacheiszeitlichen Landhebung (*postglacial rebound*) handelt es sich um ein Phänomen, das auch den Auflasteffekten zugeordnet werden könnte. Im Bereich von Skandinavien, Grönland und Kanada lasteten die eis-

²<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>

³<http://www.sbl.statkart.no/>

zeitlichen Gletscher so schwer auf den Kontinenten, daß sich diese auch tausende Jahre nach deren Abschmelzen noch ausdehnen, um wieder den voreiszeitlichen Zustand zu erreichen. In Skandinavien treten vertikale Geschwindigkeiten von maximal etwa 1 cm/a auf, die sich eindeutig in den Resultaten der geodätischen Raumverfahren nachweisen lassen (z.B. Lidberg et al., 2007). Da der Prozeß der nacheiszeitlichen Hebung über lange Zeiträume gleichmäßig verläuft, können konstante Stationsgeschwindigkeiten in vertikaler und, wenn auch betragsmäßig kleiner, in horizontaler Richtung angenommen werden, die wie der Einfluß der Plattentektonik in den Stationsgeschwindigkeiten des ITRF enthalten sind (Altamimi et al., 2002).

Einen großen Einfluß auf Stationskoordinaten können schließlich auch Erdbeben haben, die zumeist für Sprünge in den Koordinatenzeitreihen sorgen. Daneben können in einem begrenzten Zeitraum nach einem Beben aber auch nichtlineare Bewegungen auftreten. Eine Besonderheit stellen die sog. stillen Erdbeben (*silent earthquakes*) dar, bei denen sich die zwischen zwei Platten aufgebaute Spannung nicht sprunghaft entlädt, sondern über mehrere Tage quasi in Zeitlupe. Geschieht dies in regelmäßigen Abständen, so spricht man von „*episodic tremor and slip*“ (Rogers und Dragert, 2003; Steigenberger et al., 2006).

2.2.5. Sonstige Einflüsse

Quellenstruktur

Die bei der VLBI genutzten extraterrestrischen Radioquellen sind nicht perfekt punktförmig, sondern weisen eine Struktur im Millibogensekundenbereich auf. Diese Radiostrukturen hängen von der Frequenz ab, und darüber hinaus variieren die Intensitätsverteilung sowie die Intensitäten selbst mit der Zeit (Schuh, 1987). Das Problem besteht also darin, daß die Koordinaten des Quasars in gewissem Umfang zeit- und frequenzabhängig sind. Laut Tornatore und Charlot (2007) liegt der Einfluß auf die Laufzeitdifferenz zwischen zwei VLBI-Teleskopen für die meisten Quasare unterhalb der Meßgenauigkeit. Untersucht wurden allerdings nur innereuropäische Basislinien, weswegen bei längeren Basislinien ein größerer Effekt auftreten könnte. Für den Quasar 0457+024 stellten Tornatore und Charlot (2007) hingegen eine Verfälschung der Laufzeitdifferenz um bis zu 10 ps fest, weswegen diese Quelle nach ihrer Empfehlung nicht weiter für geodätische VLBI-Experimente genutzt werden sollte. Ausgedehnte Quellen könnten den Delay gar im Bereich mehrerer ns beeinträchtigen (Fey und Charlot, 2000). Angesichts der aufwendigen Modellierung der Quellenstruktur (Charlot, 1990) sowie der Vielzahl möglicher Quellen (Fey et al., 2004) scheint die Beschränkung auf möglichst kompakte und stabile Quellen bei geodätischen Experimenten eine pragmatische Lösung zu sein.

2.3. NGS Card Format

An allen an einem VLBI-Experiment beteiligten Stationen werden Quasarsignale im S- ($f_S \approx 2.3$ GHz) und X-Band ($f_X \approx 8.4$ GHz) aufgezeichnet, aus denen dann mit Hilfe des Korrelators die jeweiligen Laufzeitdifferenzen ermittelt werden können. Die Rohdaten der Korrelatoren können beispielsweise in den Formaten FITS⁴ (*flexible image transport system*), FITS-IDI⁵ (*interferometry data interchange format*) bzw. FITS-AIPS⁶ (*astronomical image processing system*) vorliegen. Die geodätischen VLBI-Analysezentren verarbeiten jedoch die Resultate des Korrelationsvorganges.

Letztere werden vom IVS momentan in zwei verschiedenen Formaten bereitgestellt. Zum einen existiert ein binäres Format, das sog. *database format* des *Goddard Space Flight Center* (GSFC), das bereits Mitte der 1970er Jahre entwickelt wurde und das die Werte für S- und X-Band in getrennten Dateien bereithält. Laut Petrov (1999) ist dieses Format schlecht dokumentiert und kann nur von Nutzern der Software CALC/SOLVE⁷ (Gordon, 2004) verarbeitet werden. Darüber hinaus dauert das Einlesen der Daten mit Hilfe des zugehörigen *database handlers* Mark-III-DBH offensichtlich deutlich zu lange. Neben dem Binärformat existiert auch ein ASCII-Format, das sog. *NGS (National Geodetic Survey) card format*, das allerdings weniger Information enthält als das *database format* (Gontier und Feissel, 2002). Dieses Format, das auf der GSFC-Homepage⁸ dokumentiert ist, wird von den meisten der übrigen VLBI-Softwarepakete verarbeitet. Spätere Ansätze zur Entwicklung eines verbesserten einheitlichen IVS-Datenaustauschformates konnten sich bislang nicht durchsetzen. Momentan werden vom IVS weder Daten im GVF- (*geo-VLBI format*; Petrov, 1999) noch im PIVEX-Format (*platform-independent VLBI exchange format*; Gontier und Feissel, 2002) vorgehalten.

⁴<http://fits.gsfc.nasa.gov/>

⁵<http://www.aips.nrao.edu/FITS-IDI.html>

⁶<http://www.aips.nrao.edu/>

⁷<http://gemini.gsfc.nasa.gov/solve/>

⁸<http://lupus.gsfc.nasa.gov/global/ngs-doc.html>

Da für die vorliegende Arbeit VLBI-Daten im *NGS card format* verarbeitet wurden, soll dieses Format im folgenden ausführlicher beschrieben werden (vgl. hierzu auch Beispieldatei im Anhang A.1). Für den Dateinamen gilt zunächst folgende Konvention:

yymmddff_Nvvv (Bsp.: 07MAY18XU_N004)

Darin steht „yy“ für die letzten beiden Ziffern der Jahreszahl, „mmm“ für das dreistellige englische Kürzel des Monats, „dd“ für den Tag, „ff“ für den zweistelligen *database code*, hinter dem sich in der Regel die Frequenz (erster Buchstabe „S“ bzw. „X“) sowie das Kürzel einer bestimmten VLBI-Session verbirgt, und „vvv“ schließlich für eine Versionsnummer. Der Buchstabe „N“ zeigt an, daß es sich um eine Datei im *NGS card format* handelt. Dateien im *database format* enthalten an dieser Stelle dagegen ein „V“. Das Datum, das sich hinter dem Dateinamen verbirgt, bezieht sich auf die erste Beobachtung, die in der Datei enthalten ist. Da 24-stündige VLBI-Sessions in der Regel zwischen 17 und 19 Uhr UTC beginnen (vgl. Kap. 6.2), ist es daher möglich, daß die Beobachtungen einer Datei zu einem großen Teil nicht von dem Tag stammen, der im Dateinamen kodiert ist, sondern vom Folgetag.

Dateien im *NGS card format* bestehen aus einem Dateikopf, welcher Informationen zu allen an der VLBI-Session beteiligten Stationen, zu allen beobachteten Quasaren sowie zu den Beobachtungstypen enthält, die im Datenteil folgen. Unter einer „Card“ versteht man eine einzelne Datenzeile. Im Dateikopf ist deren Reihenfolge festgelegt, im Datenteil geben die letzten zwei Ziffern innerhalb einer Zeile an, welche Information die entsprechende Zeile enthält. Für die Teleskopstandorte werden kartesische Koordinaten, der Montierungstyp (EQUA, AZEL, X-YN bzw. X-YE; vgl. Kap. 2.2.3) sowie der Betrag des Achsenoffsetvektors \mathbf{L} angegeben. Statt der in der Beobachtungsdatei aufgeführten Werte werden bei der Auswertung der Daten jedoch in der Regel solche aus anderen Quellen verwendet. Stationskoordinaten können einer ITRF-Realisierung⁹ entnommen werden, Werte für den Achsenoffset werden vom IVS-Analysekoordinator¹⁰ bereitgestellt und der jeweilige Montierungstyp ist beispielsweise in der Datei `blokq.dat`¹¹ verfügbar. Der Stationsname entspricht dem offiziellen 8-stelligen IVS-Namen. Weitere Stationsbezeichnungen wie ein zweistelliger IVS-Name, die 9-stellige DOMES- oder die vierstellige CDP-Nummer sind in der Datei `ns-codes.txt`¹² enthalten.

Die beobachteten Radioquellen sind einschließlich ihrer Koordinaten, Rektaszension und Deklination, im Dateikopf aufgelistet. Die momentan aktuelle Realisierung des ICRS¹³, des raumfesten Referenzsystems, ist das ICRF-Ext. 2 (Fey et al., 2004). Für die Benennung der mittlerweile über 700 katalogisierten Quellen gibt es die verschiedensten Konventionen. Einige der Quasare besitzen bis zu 17 verschiedene Namen¹⁴. Am gebräuchlichsten sind aus geodätischer Sicht die 8-stelligen IERS-Bezeichnungen: HHMM±DDd. Hierin enthalten sind die Rektaszension in Stunden und Minuten sowie die Deklination einschließlich des Vorzeichens sowie einer Dezimalstelle. Die im Namen enthaltenen Koordinaten beziehen sich jedoch auf den Referenzrahmen B1950.

Den Abschluß des Dateikopfes bilden Angaben zu den Beobachtungstypen, die in der Datei enthalten sind. Bei der Korrelation werden die auf zwei Stationen aufgezeichneten Signale schrittweise gegeneinander verschoben, um die bestmögliche Übereinstimmung zu finden. Bei derjenigen zeitlichen Verschiebung, die den maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten liefert, handelt es sich um die Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Stationen. Ein Problem ist jedoch, daß letztere während der Beobachtung eines Quasars u.a. aufgrund der Erdrotation nicht konstant ist. Stattdessen oszilliert der Korrelationskoeffizient mit der sog. Streifenfrequenz. Eine Analyse des Interferenzmusters liefert neben der Streifenfrequenz auch die Streifenphase (*fringe phase*) Φ sowie die Amplitude. Mit der Streifenphase wiederum hängen die aus geodätischer Sicht interessanten Beobachtungen zusammen, die Laufzeit (*delay*) zwischen den beiden Teleskopen sowie die Laufzeitänderung (*delay rate*). Hierbei muß jeweils noch zwischen der Phase und einer Gruppe von Wellen unterschieden werden. Die Gruppenlaufzeit (*group delay*) τ_g ist die partielle Ableitung der Streifenphase Φ nach der Beobachtungsfrequenz ω (Schuh, 1987; Sovers et al., 1998):

$$\tau_g = \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} \quad (2.26)$$

⁹<http://itrf.ensg.ign.fr/>

¹⁰<http://vlbi.geod.uni-bonn.de/IVS-AC/data/axis-offsets.txt>

¹¹http://gemini.gsfc.nasa.gov/apriori_files/blokq.dat, http://gemini.gsfc.nasa.gov/solve_root/help/blokq.html (zugehörige Formatbeschreibung)

¹²<ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/control/ns-codes.txt>

¹³<http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/icrf/icrf-ext2.html>

¹⁴<http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/info/naminfo.txt>

Die Phasenlaufzeit (*phase delay*) τ_p ist direkt proportional zur Streifenphase Φ :

$$\tau_p = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2.27)$$

Bei der Phasenlaufzeitänderung (*phase delay rate*) $\dot{\tau}_p$ handelt es sich schließlich um die Ableitung der Streifenphase Φ nach der Zeit t :

$$\dot{\tau}_p = \frac{\partial \tau_p}{\partial t} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.28)$$

Laut Haas (2004) werden in der Geodäsie bislang nur die Gruppenlaufzeiten τ_g routinemäßig verarbeitet. Die Laufzeitänderungen $\dot{\tau}_p$ spielen nur eine geringe Rolle (Hase, 1999), werden aber gelegentlich genutzt (z.B. Charlot, 1990). Die Phasenlaufzeiten τ_p sind zwar genauer als die Gruppenlaufzeiten, das Auflösen der Phasenmehrdeutigkeiten bereitet jedoch Probleme. Bislang gelingt dies zuverlässig wohl nur bei kurzen Basislinien (Herring, 1992) bzw. bei der differentiellen Auswertung von Beobachtungen zu benachbarten Quellen (Pérez-Torres et al., 2000). Bei Dateien im *NGS card format* wird neben der Referenzfrequenz, auf die sich die Streifenphase bezieht, für die in der Datei enthaltenen Laufzeiten und Laufzeitänderungen angegeben, ob es sich um Gruppen- (**GR**) bzw. Phasenwerte (**PH**) handelt.

Im Datenteil sind je Beobachtung und Basislinie bis zu neun verschiedene Zeilen (*cards*) möglich, deren Angabe mit Ausnahme der ersten optional ist. Solche Datensätze, deren Werte sich auf den Zeitpunkt der Ankunft des Quasarsignals am ersten Teleskop beziehen, sollen in zeitlich aufsteigender Reihenfolge erscheinen. Die neun verschiedenen *Cards* enthalten im einzelnen folgende Information (die fettgedruckten Einträge wurden ins *Bernese*-Format konvertiert; vgl. Kap. 3.1):

- *Card 1*: **Namen** der zwei VLBI-Stationen; **Name** des simultan beobachteten Quasars; **Zeitpunkt** (UTC) der Ankunft des Signals an der ersten Station (Beobachtungen zur halben Sekunde sind möglich)
- *Card 2*: **Laufzeit** [ns] und Laufzeitänderung [ps/s], jeweils einschließlich formalen Fehlers; **Kennzeichnung**, ob es sich bei der Beobachtung evtl. um einen Ausreißer handelt (*data quality flag*). In der Formatbeschreibung des GSFC¹⁵ heißt es fälschlicherweise, daß an den angegebenen Werten keine Korrekturen (z.B. wegen atmosphärischer Refraktion) mehr angebracht werden müßten. An anderer Stelle¹⁶ wurde dies dahingehend korrigiert, daß vorab keine Korrekturen an den Beobachtungen angebracht wurden und es sich daher um Rohbeobachtungen handelt.
- *Card 3*: weitere Resultate des Korrelationsvorgangs: Korrelationskoeffizient, Amplitude und Streifenphase inkl. ihrer formalen Fehler
- *Card 4*: Temperatur der Antennen und VLBI-Systeme (vgl. Kap. 2.2.3)
- *Card 5*: Korrekturwerte [ns] der Kabelkalibrierung (vgl. Kap. 2.2.3); Wasserdampfadiometerwerte
- *Card 6*: meteorologische Parameter: Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit auf beiden Stationen
- *Card 7*: zeitliche Differenz zwischen Referenzepoche und Beobachtungsbeginn; Beobachtungsdauer; Versatz der Uhr auf der ersten Station gegenüber UTC
- *Card 8*: **ionosphärische Korrektur für Laufzeit** [ns] und Laufzeitänderung [ps/s]; Kennzeichnung, falls Korrektur zweifelhaft (*ionosphere error flag*)
- *Card 9*: Kommentartext

Zur Veranschaulichung ist in Anhang A.1 ein Auszug der Datei 02DEC02XK_N003, der INT2-Beobachtungsdatei (vgl. Kap. 3.3.5) vom 2. Dezember 2002 gegeben.

¹⁵<http://lupus.gsfc.nasa.gov/global/ngs-doc.html>

¹⁶http://lacerta.gsfc.nasa.gov/mk5/help/dbngs_format.txt

3. VLBI in der Bernese GPS Software

Haas (2004) liefert eine Zusammenstellung vorhandener VLBI-Softwarepakete. Die größte Verbreitung haben demnach die Pakete CALC/SOLVE (Gordon, 2004), OCCAM (Titov et al., 2001, 2004) sowie MODEST (*Model Estimate*; Sovers et al., 2004) erlangt. Von wenigstens einem IVS-Analysezentrum werden darüberhinaus die Programme CALC/SOLVK (Feigl et al., 1993; Herring et al., 2006), GEOSAT (Andersen, 2000, 2007), GLORIA (*Global Radio Interferometry Analysis*; Gontier, 1992), STEELBREEZE (Bolotin, 2007) sowie VLBEST (Koyama et al., 1999) eingesetzt. Neben GEOSAT ist allerdings nur noch GINS (*Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées*; Bourda et al., 2007; Coulot et al., 2007) in der Lage, VLBI mit anderen geodätischen Raumverfahren auf Beobachtungsniveau zu kombinieren (vgl. Kap. 4.3). Da GEOSAT jedoch nicht frei verfügbar ist, und GINS bislang nicht das Niveau der international besten VLBI-Lösungen erreichen kann, erscheint es nach wie vor lohnend, weitere Softwarepakete mit VLBI-Funktionalität auszustatten.

Die *Bernese GPS Software*, die das Qualitätsniveau globaler GNSS-Lösungen mitbestimmt (Hugentobler et al., 2004), ist hierfür geradezu prädestiniert. Sie wird seit den 1980er Jahren am Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) entwickelt und ist in der Lage, Beobachtungen terrestrischer GNSS-Empfänger (momentan GPS und GLONASS) sowie Laserabstandsmessungen (SLR) zu den GNSS-Satelliten zu verarbeiten. Außerdem können mit Hilfe von GNSS-Beobachtungen an Bord tieffliegender Satelliten (LEOs) die Bahnen solcher Satelliten ermittelt werden. Aktuell wird die Software von etwa 400 Institutionen eingesetzt, um hochgenaue GNSS-Resultate zu erzeugen (Dach et al., 2007). Herzstück der Software ist das Programm GPSEST, mit dessen Hilfe die gewünschten Unbekannten durch vermittelnde Ausgleichung der Beobachtungen nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt werden können. Daneben erlaubt das Programm ADDNEQ2 die Manipulation und Kombination einzelner Lösungen auf der Ebene von Normalgleichungen.

3.1. Format-Konvertierung

Der erste Schritt zur Verarbeitung von VLBI-Beobachtungen mit der *Bernese GPS Software* ist die Konvertierung des *NGS card formats*, was vom Programm FMT0VLBI erledigt wird (vgl. Flußdiagramm in den Abb. B.1 und B.2 im Anhang B.1). Da im Falle von VLBI jeweils zwei Stationen für eine gemeinsame Beobachtung sorgen, wurde die notwendige Information in ein modifiziertes *Bernese-Format* für einfache Differenzen von Code-Beobachtungen (*code single differences*) konvertiert. Dieses ist auf S. 499ff in Dach et al. (2007) dokumentiert (vgl. auch Beispieldatei im Anhang A.2). Es existiert eine ASCII-Version (Dateiendung *.FCS) sowie eine Binärversion, bei welcher der Dateikopf (*.CSH) und die zugehörigen Beobachtungen (*.CS0) getrennt gespeichert werden.

Bei der Umformatierung sind u.a. folgende Punkte zu beachten:

- Während das *Card-Format* Beobachtungen im X- bzw. S-Band in getrennten Dateien bereithält, verwaltet das *Bernese-Format* Beobachtungen auf verschiedenen Frequenzen (L1, L2) in gemeinsamen Dateien.
- Während das *Card-Format* alle Beobachtungen einer VLBI-Session in einer einzigen Datei vorhält, also sämtliche Basislinien, für die eine Zeitdifferenz berechnet werden konnte, kann eine Datei im *Bernese-Format* lediglich die Beobachtungen einer einzigen Basislinie aufnehmen.
- Während GNSS-Beobachtungen in der Regel in regelmäßigen Intervallen von wenigen Sekunden vorliegen, sind VLBI-Beobachtungen nur in unregelmäßigen Abständen von wenigen Minuten möglich.

Wie in Kap. 2.2.2 beschrieben, stellen die Zeitdifferenzen im X-Band die primären Beobachtungsgrößen dar, während die S-Band-Beobachtungen im wesentlichen der Bestimmung der ionosphärischen Refraktion dienen. Aus diesem Grunde wurde auf die Werte für das S-Band komplett verzichtet. Stattdessen wurden die um ionosphärische Refraktion korrigierten X-Band-Beobachtungen doppelt, also anstelle von L1 und L2, in die *Bernese-Dateien* eingetragen. Dadurch erhält man die Möglichkeit, mit der *Bernese GPS Software* die ionosphärenfreie Linear-kombination L_c zu bilden, wodurch sich die Information aus dem X-Band beibehalten läßt:

$$L_c = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot L_2 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \tau_X - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \tau_X = \tau_X \quad (3.1)$$

Da nur eine Basislinie je *Bernese*-Datei möglich ist, muß vorab festgestellt werden, wie viele verschiedene Basislinien in einer Datei im *Card*-Format enthalten sind. Da sich diese Information auch nicht dem Dateikopf entnehmen läßt, müssen zunächst alle VLBI-Beobachtungen analysiert werden, um festzustellen, auf wie viele Dateien die Beobachtungen verteilt werden müssen. Das Problem der unregelmäßigen Beobachtungsrate wurde durch ein Beobachtungsintervall von 1 s „behoben“. Dadurch paßt dann zwar jede Beobachtung ins „Raster“, die vielen „fehlenden“ Epochen zwischen den VLBI-Beobachtungszeitpunkten müssen in der ASCII-Version des *Bernese*-Formates jedoch durch Leerzeilen zwischen den einzelnen Beobachtungen kenntlich gemacht werden. Da im *Bernese*-Format Leerzeilen zwischen einzelnen Datensätzen auch dann eingefügt werden, wenn sich die „Satellitenkonstellation“ ändert, wären diese bei unterschiedlichen Radioquellen in aufeinanderfolgenden Epochen ohnehin erforderlich. Finden Beobachtungen zur halben Sekunde statt, so kann dieser Sekundenbruchteil bei der entsprechenden Beobachtung als Uhrkorrektur hinterlegt werden.

Das *Bernese*-Format für *code single differences* konnte nahezu unverändert für die Speicherung von VLBI-Beobachtungen übernommen werden. Lediglich die Stellenzahl für die Satellitennummer mußte um eins erhöht werden. Da dreistellige Nummern bereits für GNSS-Satelliten sowie für LEOs reserviert sind, wurden für die Quasare vierstellige Nummern vergeben, beginnend bei 1001. Welche VLBI-Information sich hinter welchem *Bernese*-Dateieintrag verbirgt, kann Tab. 3.1 entnommen werden. Die Reihenfolge richtet sich dabei nach dem Auftreten in der ASCII-Datei.

Bei der Konvertierung wird erwartet, daß die VLBI-Datei Gruppenlaufzeiten enthält. Die gemäß Gleichung (2.18) berechnete Korrektur für die ionosphärische Refraktion wird an den rohen Laufzeitbeobachtungen im X-Band angebracht, um ionosphärenkorrigierte Werte in die *Bernese*-Beobachtungsdatei schreiben zu können. Die Umrechnung von Laufzeiten [ns] in Distanzen [m] erfolgt durch Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit c . Die Vorzeichenumkehr wurde durch das Vorzeichen der troposphärischen Korrektur in der *Bernese GPS Software* erforderlich. Da die Korrektur der troposphärischen Refraktion für GNSS und VLBI identisch sein soll, konnte dieses durch die GNSS-Auswertung vorgegebene Vorzeichen nicht angetastet werden. Stattdessen mußten sich die Vorzeichen der VLBI-Beobachtung sowie aller VLBI-Korrekturen nach dieser Vorgabe richten. Für die Namen der binären Beobachtungsdateien gilt folgende Konvention (Dach et al., 2007):

aabbssss.CSx (Bsp.: OnWz1380.CS0)

„aa“ und „bb“ stehen dabei für die zweistelligen IVS-Kürzel der Namen der ersten bzw. zweiten Station. Diese können wie die 8-stelligen Namen der Datei `ns-codes.txt`¹ entnommen werden. Bei „ssss“ handelt es sich um den sog. *session identifier*, der an den ersten drei Stellen den Tag des Jahres (*day of year* DOY) enthält. Die vierte Stelle erlaubt es, zwischen verschiedenen Beobachtungssessionen an einem Tag zu unterscheiden. Die Buchstaben „CS“ deuten an, daß die Datei *code single differences* enthält. Und anstelle des „x“ kann schließlich ein „H“ für den Dateikopf (*header*) bzw. ein „O“ für die Beobachtungen (*observations*) stehen.

3.2. Daten-Prozessierung

Das Programm GPSEST schätzt unbekannte Parameter nach der Methode der kleinsten Quadrate im Gauß-Markoff-Modell (Dach et al., 2007; Tesmer, 2004; Thaller, 2008). Im Mittelpunkt steht dabei der Widerspruch zwischen beobachteten Größen einerseits und modellierten Größen andererseits. Letztere sollen mit Hilfe von Näherungswerten für die unbekannt Parameter die Beobachtungen bestmöglich reproduzieren (vgl. Kap. 4.2). Die Differenz zwischen beobachteten und modellierten Werten („*observed minus computed*“) wird im Unterprogramm PRCEPO berechnet. Im Falle der GNSS wird dabei zunächst die Pseudostrecke zwischen Satellit und Empfänger modelliert (*zero difference* ZD; Unterprogramm PRANGE), um dann in PRCEPO einfache (zwischen zwei Empfängern) und doppelte (zwischen je zwei Empfängern und Satelliten) Differenzen bilden zu können (vgl. Flußdiagramm in den Abb. B.3 und B.4 im Anhang B.2).

Möchte man VLBI-Beobachtungen mit denselben Programmen modellieren, so muß einerseits die Bildung von Doppeldifferenzen (*double differences* DD) unterbunden werden, da nicht zwei Quasare gleichzeitig beobachtet werden können. Andererseits ist es notwendig, die Modellierung der VLBI-Beobachtungen einschließlich aller Korrekturterme auf die zwei beteiligten Stationen aufzuteilen, um dann durch Bildung einer einfachen Differenz (*single difference* SD) wieder die eigentlichen Laufzeiten zu erhalten. Dabei gilt folgendes Vorzeichen (PRCEPO):

$$SD = ZD_2 - ZD_1 \quad (3.2)$$

¹<ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/control/ns-codes.txt>

Tab. 3.1.: Auszug der wichtigsten Parameter des Bernese-Formats für Beobachtungsdaten, deren Variablennamen in den Dateien `d_gpsobs.f90` bzw. `RDOBSI.f` sowie Angaben zu den gespeicherten VLBI-Informationen (vgl. Beispieldatei im Anhang A.2).

GNSS-Parameter	Variablenname (<code>d_gpsobs.f90</code> , <code>RDOBSI.f</code>)	VLBI-Parameter
Beobachtungstyp	<code>meaTyp</code>	Ergänzend zu PHASE, CODE und RANGE wurde VLBI als neuer Beobachtungstyp eingeführt.
Satellitenanzahl	<code>nSatel</code>	Anzahl der Quasare, die auf der betreffenden Basislinie beobachtet wurden
Epochenanzahl	<code>nEpoch</code>	Weitaus größerer Wert als die Anzahl von Beobachtungen, da der Zeitraum von der ersten zur letzten Beobachtung durch das Intervall von 1 s geteilt wird (zu diesem Quotienten wird 1 addiert).
Beobachtungsintervall	<code>iDeltt</code>	Generell auf 1 s festgelegt, damit alle VLBI-Beobachtungen ins Beobachtungsraster passen (s. oben).
Stationsname	<code>sta%staNam</code>	8-stelliger IVS-Name (<code>ns-codes.txt</code> ^a)
Empfängertyp	<code>sta%recTyp</code>	Montierungstyp (EQUA, AZEL, X-YN bzw. X-YE; <code>blokq.dat</code> ^b ; vgl. Kap. 2.2.3)
Antennentyp	<code>sta%antTyp</code>	Neuer Antennentyp VLBI, für den Phasenzentrumsoffsets bzw. -variationen von Null in die entsprechende Datei eingetragen sind.
Seriennummern	<code>sta%irUnit</code> , <code>sta%iAnten</code>	auf Null gesetzt
Uhrenkorrekturtyp	<code>sta%iClock</code>	auf NONE gesetzt
Exzentrizitäten	<code>sta%posEcc</code>	X-Komponente: Achsenoffset L [m] (<code>axis-offsets.txt</code> ^c ; vgl. Kap. 2.2.3), Y- und Z-Komponente zu Null gesetzt
Beobachtungsstatistik	<code>sat%numSat</code> , <code>sat%numObs</code> , <code>sat%numMrk</code>	Bernese-interne Nummern der beobachteten Quasare; Anzahl guter und schlechter Beobachtungen für jeden Quasar (laut <i>data quality flag</i> ; entsprechende Informationen fehlen im <i>Card</i> -Format)
Beobachtungszeitpunkt	<code>OBSTIM</code>	Der im <i>NGS card format</i> enthaltene Zeitpunkt in UTC wurde umgerechnet in das modifizierte julianische Datum (MJD).
Anzahl beobachteter Satelliten pro Epoche	<code>NSAT</code>	Da nicht mehrere Quasare gleichzeitig beobachtet werden können, ist dieser Wert immer 1.
Satellitennummern	<code>NRSAT</code>	Bernese-interne Quasarnummern
Beobachtung	<code>OBSERV</code>	An den Laufzeiten aus den <i>Card</i> -Dateien werden drei Änderungen vorgenommen: (1) Anbringen der Ionosphärenkorrektur mit negativem Vorzeichen, (2) Umrechnung von [ns] in [m] sowie (3) die Umkehrung des Vorzeichens.
Uhrkorrektur	<code>DELTAT</code>	Sekundenbruchteil, falls Beobachtung nicht zur vollen Sekunde stattfindet

^a <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/control/ns-codes.txt>

^b http://gemini.gsfc.nasa.gov/apriori_files/blokq.dat

^c <http://vlbi.geod.uni-bonn.de/IVS-AC/data/axis-offsets.txt>

Da alle Terme in der VLBI-Beobachtungsgleichung (2.6) den Basislinienvektor \mathbf{b} enthalten, gelingt die Aufteilung hier jeweils durch Zerlegung in die Stationskoordinaten (vgl. Gleichung (2.2)): $\mathbf{b} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$. Während sich die Korrekturterme für die gravitativen Laufzeitverzögerungen (Gleichungen (2.12) bzw. (2.14)) mit Hilfe von $\ln(x/y) = \ln x - \ln y$ in Differenzen umformen lassen, liegt die Achsenoffsetkorrektur in Gleichung (2.24) bereits als solche vor: $\Delta\tau = l_1/c - l_2/c$.

Beim Durchlaufen der Unterprogramme PRANGE und TOPSTA, wo sämtliche Korrekturen angebracht werden, wird jeweils der erste Summand jedes einzelnen Korrekturterms der ersten Station zugeordnet, der zweite Summand entsprechend der zweiten Station. Einziges Problem dabei ist, daß die geozentrische Geschwindigkeit der zweiten Station \mathbf{v}_2 , die an derselben Stelle im Programm erst berechnet wird, auch in Termen für die erste Station

enthalten ist. Dies macht vorab einen Aufruf der Unterprogramme mit den Daten der zweiten Station notwendig, um \mathbf{v}_2 zur Verfügung zu haben. Sofern die GNSS-Verarbeitung nicht beeinträchtigt würde, könnte man hier an eine generelle Vertauschung der Verarbeitungsreihenfolge der beiden Stationen denken. Da die VLBI-Prozessierung innerhalb der *Bernese GPS Software* durchgehend im metrischen Maß erfolgt, werden sämtliche Terme mit der Lichtgeschwindigkeit c multipliziert. Der Hauptterm (2.1) wird demnach beispielsweise folgendermaßen berechnet (vgl. Gleichung (3.2)):

$$SD \approx -(\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{k} - \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{k}) = -(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{k} = -\mathbf{b} \cdot \mathbf{k} \approx \text{VLBI observation} \quad (3.3)$$

Im Unterprogramm TOPSTA wird daneben der topozentrische Vektor vom Empfänger zum Satelliten gebildet, mit dessen Hilfe u.a. Azimut und Elevation der Beobachtungsrichtung berechnet werden. Außerdem wird dieser Vektor für verschiedene partielle Ableitungen benötigt. Da mit VLBI-Teleskopen keine Strecken bzw. Laufzeiten zwischen Quasar und Teleskop, sondern lediglich Differenzen zwischen Ankunftszeiten des Quasarsignals an verschiedenen Orten auf der Erde beobachtet werden können, besteht keine Möglichkeit, einen Vektor vom Teleskop zum Quasar festzulegen. Stattdessen wurde ein Vektor gewählt, der dieselbe Richtung besitzt wie der Einheitsvektor \mathbf{k} in Quellenrichtung (vgl. Gleichung (2.3)) und dessen Betrag dem Anteil der j -ten Station an der Laufzeit entspricht (vgl. Gleichung (3.3)):

$$\mathbf{x}_{\text{topozentrisch}} = (\mathbf{r}_j \cdot \mathbf{k}) \cdot \mathbf{k} \quad (3.4)$$

Sämtliche Skalarprodukte, die aus \mathbf{b} , \mathbf{k} , \mathbf{v} bzw. \mathbf{v}_2 zu bilden sind, werden im wahren raumfesten System berechnet (vgl. Kap. 2.1). Daher müssen an \mathbf{b} und \mathbf{v}_2 zunächst Polbewegung und Erdrotation, an \mathbf{k} und \mathbf{v} hingegen Präzession und Nutation angebracht werden. Für die Auswertung von VLBI-Daten ist es dabei unbedingt notwendig, bei der Berechnung der Nutation die sog. *frame biases* (Kaplan, 2005; McCarthy und Petit, 2004) zu berücksichtigen (Unterprogramm NUTMTX), die eine konstante Verdrehung des Inertialsystems korrigieren. Auf die GNSS-Datenanalyse hat eine Vernachlässigung dieser Terme dagegen kaum einen Einfluß.

Anstatt der Frequenzen f_1 und f_2 der Trägerwellen L1 und L2 sind VLBI-Frequenzen in die Datei CONST. einzutragen. Statt der für das jeweilige Experiment im *NGS card format* angegebenen Referenzfrequenz werden konstante Werte von $f_X = 8.4$ GHz für das X-Band bzw. $f_S = 2.3$ GHz für das S-Band verwendet. Da die Korrektur der ionosphärischen Refraktion nach Gleichung (2.18) vom Korrelator übernommen wird, sollte eine Mißachtung des Mittelwertes der tatsächlich verwendeten Frequenzkanäle jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Resultate haben.

Wie in Kap. 2.2.3 beschrieben, setzen die meisten VLBI-Softwarepakete quadratische Funktionen zur Korrektur der Drift der Stationsuhren an. In der *Bernese GPS Software* wurde der Uhrfehler dagegen als stückweise stetige Funktion modelliert (Dach et al., 2007, S. 148), deren Auflösung Δt beliebig gewählt werden kann. Eine entsprechende Modellierung findet auch für die Troposphärenparameter Anwendung. Der Einfluß einer Beobachtung auf eine Stützstelle des Polygons richtet sich dabei nach dem zeitlichen Abstand vom Bezugszeitpunkt t_{ref} der Stützstelle:

$$\text{Interpolationsfaktor} = 1 - \frac{t_{obs} - t_{ref}}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Neben einer linearen und/oder quadratischen Drift können auch Sprünge in der Zeitmessung auftreten. Sind solche vorab bekannt, können diese neben Unstetigkeiten der Koordinaten aufgrund von Erdbeben, Ausrüstungswechseln o.ä. in die Datei STACRUX.STA eingetragen werden. Zum Zeitpunkt des Uhrensprungs wird dann die stückweise stetige Funktion unterbrochen. Dies ist insbesondere auch dann von Interesse, wenn Beobachtungen aufeinanderfolgender VLBI-Sessions gemeinsam ausgewertet werden (vgl. Kap. 6.2), da an der Grenze der Sessions in jedem Fall ein Uhrensprung zugelassen werden muß.

Primäre Zielparameter der geodätischen VLBI sind laut Tesmer (2004) Quasar- und Stationskoordinaten sowie die EOP, die für die Transformation vom erd- ins raumfeste System benötigt werden. Daneben können theoretisch alle Größen aus der Beobachtungsgleichung einschließlich aller Korrekturen aus Kap. 2.2 aus VLBI-Beobachtungen geschätzt werden. Hierzu werden im Unterprogramm SNDIFF die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichung nach den jeweiligen unbekanntem Parametern bereitgestellt. Während die Schätzung von Quasarkoordinaten bislang nicht in die *Bernese GPS Software* implementiert ist, konnten die partiellen Ableitungen nach Stationskoordinaten und Troposphärenparametern unverändert von der GNSS- in die VLBI-Auswertung übernommen werden. Und dies, obwohl sich in beiden Fällen teilweise unterschiedliche Größen hinter den Variablen verbergen, wie z.B. der Vektor in Quasarrichtung aus Gleichung (3.4) anstatt des topozentrischen Vektors vom GNSS-Empfänger

zum Satelliten. Überprüft wurde die Eignung der partiellen Ableitungen jeweils durch den Versuch der Schätzung bekannter, a priori durchgeführter Manipulationen an den entsprechenden Parametern.

Im Falle der EOP hingegen müssen die partiellen Ableitungen, die für GNSS-Beobachtungen in Beutler et al. (1998) dokumentiert sind, an die VLBI-Verhältnisse angepaßt werden. Beutler et al. (1998) gehen bei ihrer Herleitung von einer gemessenen Strecke ρ zwischen Satellit und Empfänger aus, also von der sog. *zero difference* ZD. Wird diese partiell nach einem der EOP (Nutation, Erdrotation, Polbewegung) abgeleitet, so erhält man folgendes:

$$\frac{\partial \text{ZD}}{\partial \text{EOP}} = \frac{\partial \rho}{\partial \text{EOP}} = \frac{\partial (\mathbf{R} - \mathbf{r})}{\partial \text{EOP}} = -\mathbf{e}^T \cdot \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \text{EOP}} = -\mathbf{e}^T \cdot \frac{\partial \mathbf{PNUYX}}{\partial \text{EOP}} \cdot \mathbf{r}'' \quad (3.6)$$

Darin steht \mathbf{R} für den geozentrischen Ortsvektor des Satelliten, \mathbf{r} für den Ortsvektor des Empfängerstandortes, \mathbf{e} für den Einheitsvektor, der vom Empfänger zum Satelliten zeigt, und \mathbf{PNUYX} für die Rotationsmatrix vom erd- ins raumfeste System (vgl. Kap. 2.1). Für die Nutation in der Schiefe $\Delta\epsilon$ ergibt sich daraus beispielsweise folgende partielle Ableitung:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \Delta\epsilon} &= -e'_2 z' + e'_3 y' = -\frac{Y' - y'}{\rho} \cdot z' + \frac{Z' - z'}{\rho} \cdot y' = \frac{1}{\rho} \cdot (-Y' z' + y' z' + Z' y' - z' y') = \frac{1}{\rho} \cdot (-Y' z' + Z' y') \\ &= \frac{Z' - z'}{\rho} \cdot Y' - \frac{Y' - y'}{\rho} \cdot Z' = e'_3 Y' - e'_2 Z' \end{aligned} \quad (3.7)$$

Anhand von Gleichung (3.7) ist zu erkennen, daß Satelliten- und Stationskoordinaten in der partiellen Ableitung austauschbar sind ($e'_3 y' - e'_2 z' = e'_3 Y' - e'_2 Z'$). Wichtig ist allerdings, daß sämtliche Vektorkomponenten im selben System vorliegen. Die gestrichelten Variablen stehen dabei für Vektorkomponenten im wahren raumfesten System, zweigestrichene für erdfeste Komponenten. Im Unterprogramm PDTRNS, das die partiellen Ableitungen nach den EOP bereitstellt, werden die Ableitungen nach den Nutationswinkeln $\Delta\epsilon$ und $\Delta\psi$ im wahren raumfesten System berechnet, diejenigen nach ΔUT (vgl. Kap. 2.2.1) und den Polkoordinaten x_p und y_p im erdfesten System. Dabei kommen Satellitenkoordinaten zum Einsatz, die im Falle von VLBI nicht vorliegen.

Für die VLBI-Beobachtungen können allerdings entsprechende partielle Ableitungen aus dem ZD-Term ($-\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}$) abgeleitet werden:

$$\frac{\partial \text{ZD}}{\partial \text{EOP}} = \frac{\partial (-\mathbf{r} \cdot \mathbf{k})}{\partial \text{EOP}} = -\mathbf{k}^T \cdot \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \text{EOP}} = -\mathbf{k}^T \cdot \frac{\partial \mathbf{PNUYX}}{\partial \text{EOP}} \cdot \mathbf{r}'' \quad (3.8)$$

Damit erhält man für VLBI völlig konsistente Terme, die statt des Einheitsvektors \mathbf{e} in Richtung des Satelliten den entsprechenden Vektor \mathbf{k} in Richtung der Radioquelle enthalten:

$$\frac{\partial \text{ZD}}{\partial \Delta\epsilon} = k'_3 y' - k'_2 z' \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \text{ZD}}{\partial \Delta\psi} = \sin \epsilon \cdot (k'_3 x' - k'_1 z') \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \text{ZD}}{\partial \Delta\text{UT}} = k''_1 y'' - k''_2 x'' \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \text{ZD}}{\partial x_p} = k''_1 z'' - k''_3 x'' \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \text{ZD}}{\partial y_p} = k''_3 y'' - k''_2 z'' \quad (3.13)$$

Anstelle von Satellitenkoordinaten sind von SMDIFF an PDTRNS also Stationskoordinaten zu übergeben. Da letztere im Vergleich zu den raumfesten Satellitenkoordinaten an der entsprechenden Stelle im Programm im erdfesten System vorliegen, müssen diese dort trotz der Austauschbarkeit in den partiellen Ableitungen jedoch anders behandelt werden. Würde man die partiellen Ableitungen nach den EOP auch im Falle der GNSS-Verarbeitung aus Stationskoordinaten bilden, könnte hier eine Fallunterscheidung vermieden werden. (Anmerkung: Ein bislang ungelöstes Software-Problem besteht noch darin, daß die Schätzwerte für $\Delta\epsilon$ bei den Resultaten für $\Delta\psi$ landen und umgekehrt.) Eine alternative Formulierung der partiellen Ableitungen nach den EOP findet sich z.B. in Nothnagel (1991).

Tab. 3.2.: Unterprogramme und Modelle, mit denen die störenden Einflüsse auf VLBI-Beobachtungen aus Kap. 2.2 in der Bernese GPS Software korrigiert werden (Fehlerbudget s. Sovers et al., 1998).

Effekt	Unterprogramm	Gleichung/Modell
Aberration	TOPSTA	Gleichung (2.6)
Uhrensynchronisation	TOPSTA	Gleichung (2.6)
Uhrengang (relativistisch)	TOPSTA	Gleichungen (2.6) und (2.8)
Präzession	PREN20	IAU 2000A unter Verwendung der klassischen Rotationen (McCarthy und Petit, 2004)
Nutation	NUTMTX	IAU 2000A unter Verwendung der klassischen Rotationen (IAU2000.NUT; McCarthy und Petit, 2004)
Erdrotation	TOPSTA	Beobachtungszeitpunkt in <i>Greenwich True Sidereal Time</i> GST
Polbewegung	TOPSTA	z.B. IERS Bulletin A (Luzum et al., 2001)
Gravitationsfeld der Sonne	TOPSTA	Gleichung (2.12) (unter Beachtung des Vorzeichens aus Gleichung (3.2) gilt: $SD = C \cdot \ln \frac{\text{Station1}}{\text{Station2}} = -C \cdot \ln \frac{\text{Station2}}{\text{Station1}} = -C \cdot (\text{Station2} - \text{Station1})$)
Gravitationsfeld der Erde	TOPSTA	Gleichung (2.14) (Erklärung für negatives Vorzeichen vgl. Gravitationseinfluß der Sonne)
Troposphärische Refraktion	PRANGE	z.B. Standardatmosphäre nach Berg (1948) in Verbindung mit einer der vielzähligen <i>mapping functions</i> (z.B. Niell, 1996)
Ionosphärische Refraktion	RDFMTVI	Gleichung (2.18), Übernahme der Korrektur vom Korrelator
Achsenoffset	TOPSTA	Gleichungen (2.19) bis (2.24) (umgekehrtes Vorzeichen in den Gleichungen (2.24) und (3.2) ist zu beachten)
Kabelkalibrierung	—	bislang nicht berücksichtigt
Teleskopdeformationen	—	bislang nicht berücksichtigt
Uhrenverhalten	SNDIFF	Modellierung als stückweise stetige Funktion
Korrelationsfehler	—	bislang nicht berücksichtigt
Plattentektonik	GETSTAT	z.B. Stationsgeschwindigkeiten des ITRF2005 (Altamimi et al., 2007)
Gezeiten der festen Erde	TIDE2000	McCarthy und Petit (2004)
Polgezeiten	TIDE2000	McCarthy und Petit (2004)
Ozeanauflast	TIDE2000	z.B. FES2004 (Letellier, 2004)
Atmosphärenauflast	—	bislang nicht berücksichtigt
Postglaziale Landhebung	GETSTAT	in den Stationsgeschwindigkeiten des ITRF enthalten
Quellenstruktur	—	bislang nicht berücksichtigt

Abschließend zeigt Tab. 3.2, welche der störenden Einflüsse aus Kap. 2.2 bei der Verarbeitung von VLBI-Beobachtungen mit der *Bernese GPS Software* bislang berücksichtigt werden, und vor allem auch, welche nicht. Die Reihenfolge der Effekte richtet sich dabei nach Kap. 2.2. Tab. 3.2 ist erstens zu entnehmen, mit welchem Modell der jeweilige Effekt korrigiert wird. Finden sich die verwendeten Korrekturformeln in der vorliegenden Arbeit, so wird direkt auf diese verwiesen, in den übrigen Fällen sind die entsprechenden Quellen angegeben. Zweitens gibt Tab. 3.2 auch Auskunft darüber, an welchen Stellen des Auswerteprogramms die entsprechenden Korrekturen angebracht werden. Für nähere Informationen hierzu sei auf Anhang B sowie auf Dach et al. (2007) verwiesen.

Da sich sowohl die VLBI- als auch die GNSS-Technik elektromagnetischer Strahlung im Mikrowellenbereich bedient, wirken sich sehr viele der in Tab. 3.2 aufgelisteten Effekte gleichartig auf die jeweiligen Beobachtungen aus. Dies bedeutet, daß viele der Korrekturmodelle auf beide Techniken anzuwenden sind. Hierzu zählen insbesondere die EOP (Präzession, Nutation, Erdrotation, Polbewegung), wobei von VLBI-Seite hier größere Anforderungen an die Qualität des Modells gestellt werden, sowie sämtliche Veränderungen der Stationspositionen (Plattentektonik, Gezeiten der festen Erde, Polgezeiten, Ozeanauflast, Atmosphärenauflast, nacheiszeitliche Landhebung). Auch was die Korrektur der troposphärischen Refraktion anbelangt, sind keinerlei Änderungen an der *Bernese GPS Software* notwendig, um VLBI-Beobachtungen verarbeiten zu können. Würde man nicht auf die vom Korrelator ermittelte Ionosphärenkorrektur zurückgreifen, sondern stattdessen die „rohen“ S- und X-Band-Beobachtungen verarbeiten (vgl. Kap. 3.1), so würde, abgesehen von unterschiedlichen Frequenzwerten, dasselbe auch für die Korrektur der ionosphärischen Refraktion gelten.

Neben abweichenden Modellierungen des relativistischen Effektes aufgrund der Gravitationseinflüsse von Sonne und Erde müssen damit also lediglich Effekte neu implementiert werden, die entweder mit der Lorentztransformation zwischen baryzentrischem und geozentrischem System (Aberration, Uhrensynchronisation, Uhrengang), mit den VLBI-Teleskopen (Achsenoffset, Kabelkalibrierung, Teleskopdeformationen, Uhrenverhalten, Korrelationsfehler) oder mit den Quasaren (Quellenstruktur) zusammenhängen. Da einige der dem VLBI-System eigenen Effekte zudem nur einen sehr geringen Einfluß haben, ist der Aufwand für die Implementierung der VLBI-Prozessierung in ein bestehendes GNSS-Auswertepaket überschaubar und daher auch attraktiv. In umgekehrter Richtung müßten u.a. für die Implementierung der Satellitenbahnen oder der Mehrdeutigkeitslösung weitaus größere Anstrengungen unternommen werden.

Ein Element der VLBI-Stationen, die Stationsuhr, ist auch für GNSS-Beobachtungen unverzichtbar. Trotzdem kann die Modellierung des Uhrenverhaltens, die in der *Bernese GPS Software* implementiert ist, nicht auf VLBI-Beobachtungen übertragen werden. Da nicht jeder GNSS-Empfänger auf der Erde auf das Zeitsignal einer hochgenauen Atomuhr zurückgreifen kann, wird bei GNSS-Auswertungen für jede Meßepoche eine gesonderte Uhrkorrektur berechnet (Dach et al., 2007). Im Falle des VLBI-Systems genügt es dagegen, einen konstanten sowie einen zeitlich veränderlichen Versatz zwischen den einzelnen Atomuhren zu bestimmen, die über eine hohe Lang- und Kurzzeitstabilität verfügen (vgl. Kap. 2.2.3). Im Unterprogramm SNDIFF müssen also je nach Beobachtungstechnik partielle Ableitungen für epochenweise Uhrparameter (Parametertyp 23) bzw. für stückweise stetige Uhrparameter (Parametertyp 2) bereitgestellt werden.

3.3. Erreichbare Genauigkeiten

Um einen Eindruck von der Qualität der mit Hilfe der *Bernese GPS Software* berechneten VLBI-Lösungen zu erhalten, wurden Beobachtungsdaten verschiedener VLBI-Experimente verarbeitet. Eine größtmögliche Anzahl von Beobachtungen liefern kontinuierliche Messungen auf möglichst vielen Stationen gleichzeitig. Da derartige Kampagnen allerdings mit einem hohen organisatorischen Aufwand verbunden sind, können sie auch nur in unregelmäßigen Abständen durchgeführt werden. Beispiele für kontinuierliche VLBI-Meßkampagnen sind u.a. CONT96, CONT02 (Thomas und MacMillan, 2003) sowie CONT05 (MacMillan et al., 2006).

Im folgenden werden Daten der zweiwöchigen Kampagne CONT02 betrachtet, an der insgesamt acht Teleskope beteiligt waren (vgl. Kap. 6.1). Die Daten wurden tageweise verarbeitet unter Berücksichtigung der „natürlichen“ Tagesgrenzen um 0 bzw. 24 Uhr UTC (vgl. Kap. 6.2). Parameter, die zwingend in jeder Eintageslösung mitgeschätzt werden müssen, sofern sie nicht vorab unabhängig bestimmt werden können, sind die troposphärische Verzögerung in Zenitrichtung (*tropospheric zenith delay* TZD) sowie Korrekturen für die Stationsuhren. Die Auflösung, mit der diese Parameter bestimmt werden sollen, ist dagegen mehr oder weniger frei wählbar.

3.3.1. Einfluß implementierter Modelle

Ein erster Test soll zunächst überprüfen, ob sich die in Tab. 3.2 aufgelisteten Modelle wie gewünscht auf das Resultat auswirken, und ob sich die Größenordnungen der durch Berücksichtigung der Modelle erzielten Verbesserungen mit denen aus Tab. 2.1 decken. Hierzu wurden 15 Eintageslösungen für die Tage 290 bis 304 (17.–31. Oktober 2002) berechnet, bei denen jeweils Korrekturen für die Stationsuhren mit 6-stündiger, troposphärische Verzögerungen mit 2-stündiger und Troposphärengradienten mit 24-stündiger Auflösung geschätzt wurden. Korrekturen für die Stationsuhren wurden dabei jeweils relativ zur Uhr in Algonquin Park (Kanada) berechnet, Troposphärenverzögerungen wurden mit den *Niell (1996) Mapping Functions* in die entsprechende Beobachtungsrichtung umgerechnet, und Troposphärengradienten wurden durch eine Verkippung der „troposphärischen“ Zenitrichtung modelliert (vgl. Dach et al., 2007). Auf ihren a priori-Werten festgehalten wurden dagegen Stationskoordinaten und EOP. Für die Stationen lagen Werte im ITRF2000 vor, die EOP wurden auf C04-Werten (vgl. Gambis, 2004) des IERS fixiert.

Mit Hilfe des Programms GPSEST wurden unabhängige Eintageslösungen berechnet, und dabei jeweils der mittlere Gewichtseinheitsfehler $\hat{\sigma}_0$ nach der Ausgleichung betrachtet. Werden alle störenden Einflüsse aus Tab. 3.2 berücksichtigt, so ergibt sich ein mittlerer Gewichtseinheitsfehler $\bar{\hat{\sigma}}_0$ über alle 15 Tage von 1.26 cm bei einer Streuung von 0.16 cm. Für die Verarbeitung von GPS-Phasenmessungen sind laut Dach et al. (2007) zum Vergleich 1–3 mm zu erwarten.

Wird nun die Korrektur einzelner störender Einflüsse unterdrückt, so verschlechtert sich erwartungsgemäß der mittlere Gewichtseinheitsfehler $\hat{\sigma}_0$. Da die in jeder Lösung mitgeschätzten Troposphären- und Uhrenparameter jeweils einen Teil des störenden Effektes aufnehmen können, ist die Auswirkung auf $\hat{\sigma}_0$ jedoch jeweils um etwa eine Größenordnung kleiner als die in Tab. 3.3 angegebenen nicht modellierten Fehler. Zudem handelt es sich bei

Tab. 3.3.: Einfluß verschiedener Effekte auf den mittleren Gewichtseinheitsfehler $\hat{\sigma}_0$ nach der Ausgleichung (Mittelwert und Streuung aus 15 CONT02-Eintageslösungen).

Nicht berücksichtigter Effekt	Maximaler Einfluß	$\bar{\hat{\sigma}}_0$ [m]
—	—	0.013 ± 0.002
Gravitationsfeld der Erde	$2 \cdot 10^{-11} \text{ s} \approx 0.006 \text{ m}$	0.013 ± 0.002
Uhrengang (relativistisch)	$5 \cdot 10^{-10} \text{ s} \approx 0.150 \text{ m}$	0.029 ± 0.001
Gravitationsfeld der Sonne	$\sim 5 \cdot 10^{-9} \text{ s} \approx 1.500 \text{ m}$	0.053 ± 0.003
Achsenoffset	$\sim 2.000 \text{ m}$	0.557 ± 0.027
Tägliche Aberration	$4 \cdot 10^{-8} \text{ s} \approx 12.000 \text{ m}$	0.846 ± 0.009
Uhrensynchronisation	$2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 600.000 \text{ m}$	16.857 ± 0.857
Jährliche Aberration	$2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 600.000 \text{ m}$	81.421 ± 2.507

letzteren in der Regel um Maximalwerte, die nicht bei jeder einzelnen Beobachtung erreicht werden. Wie Tab. 3.3 zeigt, steigt der Mittelwert für $\hat{\sigma}_0$ über alle 15 Eintageslösungen mit größer werdendem vernachlässigtem Effekt kontinuierlich an, was für die Plausibilität der Resultate spricht. Die Standardabweichungen für $\hat{\sigma}_0$ zeigen an, daß manche Effekte, wie z.B. die tägliche Aberration, wohl besonders gut durch Uhren- bzw. Troposphärenparameter aufgenommen werden können.

3.3.2. Schätzung von Stationskoordinaten

Werden zusätzlich Stationskoordinaten als unbekannte Parameter geschätzt, so lassen sich die Normalgleichungen, die das Programm GPSEST liefert, mit Hilfe des Programms ADDNEQ2 kombinieren, um anstatt täglicher Koordinaten lediglich einen Satz von Koordinaten für die gesamte CONT02-Kampagne zu erhalten. Dabei ist jedoch zu beachten, daß nicht Koordinaten für alle Stationen gleichzeitig bestimmt werden können, ohne eine Zusatzbedingung einzuführen, da sonst ein sog. Datumsdefekt auftritt. Solange die EOP auf ihren a priori-Werten fixiert werden, weist das Gleichungssystem einen Rangdefekt von 3 auf (Mendes Cerveira et al., 2007). Tab. 3.4 zeigt verschiedene Möglichkeiten zur Behebung des Datumsdefektes sowie deren Auswirkungen auf die Resultate. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler $\hat{\sigma}_0$ wird durch die Hinzunahme der Koordinaten zu den unbekanntem Parametern unwesentlich kleiner, kann allerdings ansonsten keinerlei Beitrag zur Auswahl einer geeigneten Maßnahme zur Behebung des Datumsdefektes liefern.

Aussagekräftiger erscheint hier die Wiederholbarkeit der Koordinaten, die durch Vergleich der täglichen Koordinatenlösungen ermittelt wird. Je geringer die Unterschiede zwischen den Koordinatenschätzungen für die 15 einzelnen Tage, desto besser. Hält man die Koordinaten einer Station fest, so hängt die Wiederholbarkeit stark von der Lage der Station sowie von der Qualität der dort aufgezeichneten Beobachtungen ab, wie Tab. 3.4 exemplarisch an zwei Beispielen (Algonquin Park, Hartebeesthoek) zeigt. Gibt man a priori eine Genauigkeit σ für die Näherungskordinaten vor, so verbessert sich die Wiederholbarkeit zwangsläufig mit kleiner werdendem σ , da zunehmend mehr Zwang auf die Koordinaten ausgeübt wird. Positiv zu werten ist aber in jedem Fall, daß auch ein verhältnismäßig großes σ von 1 m noch eine stabile Lösung liefern kann, die von der Qualität her vergleichbar ist mit einer NNT-Lösung.

Bei einer NNT-Lösung (*no-net-translation*) wird verlangt, daß die Summe aller Translationen zwischen Näherungskordinaten und geschätzten Koordinaten Null ergeben muß. Eine NNR-Bedingung (*no-net-rotation*) übt einen entsprechenden Zwang auf die Rotationen um die Koordinatenachsen aus. Wie ein Vergleich von NNT, NNR und einer Kombination der beiden in Tab. 3.4 zeigt, läßt sich die beste Koordinatenwiederholbarkeit durch die NNT-Bedingung erzielen. Diese erzwingt, daß der Koordinatenursprung der Lösung im Ursprung des Referenzrahmens (hier: ITRF2000) zu liegen kommt (Dach et al., 2007). Die für die VLBI-Stationen erzielte Koordinatenwiederholbarkeit von etwa 1 cm ist in jedem Fall zufriedenstellend. Steigenberger et al. (2006) konnten bei einer Neuverarbeitung der GPS-Beobachtungsdaten von über 10 Jahren zum Vergleich eine durchschnittliche Wiederholbarkeit von etwa 6 mm für die GPS-Stationen erzielen. Dabei könnte jedoch auch eine Rolle spielen, daß im GPS-Netz aufgrund der deutlich höheren Anzahl von Stationen zumeist kürzere Basislinien auftreten.

3.3.3. Zeitliche Auflösung der Parameter

Im folgenden soll nun noch untersucht werden, welchen Einfluß die zeitliche Auflösung der Troposphären- und Uhrenparameter auf die Resultate hat, und ob das Schätzen von EOP eine Verbesserung bringen kann. Alle

Tab. 3.4.: Einfluß verschiedener Maßnahmen zur Behebung des Datumsdefektes auf die Wiederholbarkeit der Koordinaten (Verwendung aller CONT02-Daten).

Behebung des Datumsdefektes	$\hat{\sigma}_0$ [cm]	Wiederholbarkeit [cm]			
		Nord	Ost	Höhe	3D
Koordinaten aller Stationen fixiert	1.30	–	–	–	–
Koordinaten von Algonquin Park (Kanada) fixiert	1.24	0.43	0.27	0.93	1.06
Koordinaten von Hartebeesthoek (Südafrika) fixiert	1.24	0.24	0.29	0.74	0.83
$\sigma_{a \text{ priori}} = 1.0$ m für alle Koordinaten	1.24	0.40	0.30	0.92	1.05
$\sigma_{a \text{ priori}} = 0.01$ m für alle Koordinaten	1.24	0.40	0.30	0.92	1.04
$\sigma_{a \text{ priori}} = 0.001$ m für alle Koordinaten	1.24	0.33	0.26	0.77	0.88
$\sigma_{a \text{ priori}} = 0.0001$ m für alle Koordinaten	1.25	0.28	0.16	0.51	0.60
No-Net-Translation-Bedingung (NNT)	1.24	0.40	0.30	0.92	1.05
No-Net-Rotation-Bedingung (NNR)	1.24	0.40	0.33	0.97	1.10
NNT/NNR	1.24	0.36	0.35	1.04	1.15

Tab. 3.5.: Einfluß der Parametrisierung der Stationsuhr auf den mittleren Gewichtseinheitsfehler $\hat{\sigma}_0$ sowie auf die Wiederholbarkeit der Koordinaten (CONT02-Daten ohne Tag 302).

Zeitliche Auflösung der Stationsuhr [h]	Anz. Parameter je Station	$\hat{\sigma}_0$ [cm]	Wiederholbarkeit [cm]			
			Nord	Ost	Höhe	3D
24	4	1.37	0.49	0.36	1.02	1.18
12	5	1.26	0.42	0.31	0.93	1.07
8	6	1.24	0.40	0.29	0.92	1.04
6	6	1.23	0.40	0.31	0.91	1.04
4	9	1.20	0.42	0.31	0.93	1.07
3	10	1.18	0.40	0.32	0.93	1.07
2	14	1.16	0.41	0.33	0.96	1.09
1	26	1.08	0.34	0.30	0.88	0.99

Vergleiche im Zusammenhang mit Troposphäre und Uhren beruhen dabei auf NNT-Lösungen. Werden neben den Koordinaten auch EOP als Unbekannte geschätzt, reicht die NNT-Bedingung allein nicht aus, da der Rangdefekt des Gleichungssystems auf maximal 6 anwächst (Mendes Cerveira et al., 2007). In diesen Fällen wird daher zusätzlich eine NNR-Bedingung angebracht.

Als Zahlenwerte für die Auflösung von Parametern sind prinzipiell alle Teiler von 24 möglich. Da die VLBI-Beobachtungen für die vorliegenden Untersuchungen jeweils in 24 h-Blöcken von 0:00 bis 24:00 Uhr UT anstatt von 18:00 bis 18:00 Uhr UT verarbeitet wurden (vgl. Kap. 6.2), muß für die Stationsuhr jedoch jeweils um 18:00 Uhr ein neues Polygon angesetzt werden, da die Beobachtungen vor und nach 18:00 Uhr aus unterschiedlichen VLBI-Sessionen stammen. Dies hat zur Folge, daß eine höhere zeitliche Auflösung nicht automatisch auch eine größere Zahl zu schätzender Uhrparameter bedeutet, wie ein Vergleich von 8- und 6-stündiger Auflösung zeigt (s. Tab. 3.5). Da 6 auch ein Teiler von 18 ist, sind die Uhrparameter bei 6-stündiger Auflösung gleichmäßiger verteilt als im Falle der 8-stündigen Auflösung.

Erwartungsgemäß sinkt der Wert für $\hat{\sigma}_0$ mit zunehmender Anzahl von Uhrparametern, da sich Widersprüche besser verteilen können. Zur Auswahl einer geeigneten Auflösung kann $\hat{\sigma}_0$ daher nicht verwendet werden. Die Koordinatenwiederholbarkeit variiert zwar auch nur wenig, zeigt allerdings bei 8 bzw. 6 h ein Optimum, zumindest wenn man die Auflösung von 1 h außer Acht läßt, die eine unerwünscht große Zahl von Parametern verursacht. Aufgrund der gleichmäßigeren Verteilung der Parameter über den Tag ist die 6-stündige Auflösung dabei vorzuziehen (s. oben). Die Tatsache, daß auch mit sehr wenigen Uhrparametern ein vergleichbar gutes Resultat erzielt werden kann, zeigt, daß in erster Näherung von einem linearen Verhalten der Stationsuhren ausgegangen werden kann (vgl. Kap. 2.2.3). Falls ein subtägliches, nichtlineares Verhalten der Stationsuhren berücksichtigt werden soll, kann anhand des vorliegenden Beispiels eine Auflösung von 6 h empfohlen werden, andernfalls läßt sich die Zahl der Parameter durch eine 24-stündige Auflösung bestmöglich beschränken.

Tab. 3.6.: Einfluß der Parametrisierung der Erdrotation auf den mittleren Gewichtseinheitsfehler $\hat{\sigma}_0$ sowie auf die Wiederholbarkeit der Koordinaten (Verwendung aller CONT02-Daten).

ERP	Nutation	$\hat{\sigma}_0$ [cm]	Wiederholbarkeit [cm]			
			Nord	Ost	Höhe	3D
fixiert	fixiert	1.24	0.36	0.35	1.04	1.15
24 h	fixiert	1.23	0.41	0.30	0.93	1.06
12 h	fixiert	1.23	0.41	0.29	0.94	1.06
6 h	fixiert	1.22	0.42	0.29	0.96	1.08
2 h	fixiert	1.20	0.44	0.29	0.99	1.12
fixiert	24 h	1.23	0.36	0.31	1.00	1.11

Was die Troposphäre betrifft, sollten Zenitverzögerungen (TZD) mit 2-stündiger Auflösung sowie Gradienten Berücksichtigung finden, um der hohen zeitlichen Variabilität (vgl. Kap. 6.3) sowie der azimutalen Asymmetrie der Troposphäre Rechnung zu tragen. Reduziert man die Auflösung der TZD auf 4 h, so steigt $\hat{\sigma}_0$ von 1.24 auf 1.54 cm an, während sich die Koordinatenwiederholbarkeit von 1.05 auf 1.30 cm verschlechtert. Werden Gradienten außer Acht gelassen, verschlechtern sich der mittlere Gewichtseinheitsfehler auf 1.42 cm und die Wiederholbarkeit der Koordinaten auf 1.13 cm.

Das Schätzen von EOP hat nur einen geringen Einfluß auf die übrigen Parameter (s. Tab. 3.6). Dies spricht sowohl für die Qualität der a priori-Information (C04; vgl. Kap. 3.3.1) als auch für die Stabilität der Lösung. Wiederum sinkt $\hat{\sigma}_0$ mit zunehmender Parameteranzahl leicht ab, was gleichermaßen für die Bestimmung der Erdrotationsparameter (ERP: Polkoordinaten, ΔUT) und der Nutation gilt. Auch die Koordinatenwiederholbarkeit profitiert in beiden Fällen leicht. Die Schätzung von ERP verbessert letztere um bis zu 1 mm.

3.3.4. CONT02-Residuen

Schließlich lohnt noch ein Blick auf die Residuen, d.h. auf die Verbesserungen $\hat{\mathbf{v}}$, die in der vermittelnden Ausgleichung an den einzelnen Beobachtungen angebracht werden. Die Abb. 3.1 und 3.3 zeigen die Verbesserungen aller Beobachtungen auf den Stationen Wettzell und Hartebeesthoek während eines Tages der CONT02-Kampagne. Da die südafrikanische Station am Rande des Netzes und von allen anderen Stationen verhältnismäßig weit entfernt liegt, sind die von den übrigen Stationen beobachteten Quasare dort nicht immer sichtbar, weswegen die Beobachtungsanzahl deutlich geringer ausfällt als in Wettzell.

Abb. 3.1 zeigt die Verbesserungen jeder möglichen Differenz τ zwischen den Ankunftszeiten eines Quasarsignals am Radioteleskop in Wettzell sowie an jeder anderen CONT02-Station, die simultan denselben Quasar beobachten konnte. Gleiche Buchstaben stehen dabei für denselben Quasar. Da in der Regel mehrere Teleskope gleichzeitig denselben Quasar beobachten, können zu einem Zeitpunkt mehrere Basislinien gebildet werden. Aus diesem Grund liegen zu einem bestimmten Zeitpunkt zumeist mehrere Beobachtungen zu ein und demselben Quasar vor. Da jedoch nicht alle Teleskope die Aufzeichnung der Signale eines bestimmten Quasars exakt zum selben Zeitpunkt beginnen bzw. beenden und damit unterschiedliche Überlappungen vorliegen, können sich die Bezugszeitpunkte verschiedener Beobachtungen τ zu identischen Quasaren leicht voneinander unterscheiden.

Bei der Erzeugung der in den Abb. 3.1 und 3.3 dargestellten Lösungen wurden alle Stationskoordinaten fixiert (vgl. Tab. 3.4), während die TZD mit 2-stündiger, Korrekturen für die Stationsuhr mit 6-stündiger (vgl. Tab. 3.5) sowie Troposphärengradienten mit 24-stündiger Auflösung geschätzt wurden. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler für die Eintageslösung des Tages 290, für welche die CONT02-Beobachtungen aller Stationen verwendet wurden, beträgt 1.27 cm, was etwa 42.3 ps entspricht (100 ps entsprechen etwa 3 cm). In Anbetracht der Tatsache, daß die Modellierung der VLBI-Beobachtungen ps-genau vorgenommen wurde (vgl. Kap. 2.1), scheint dies sehr viel zu sein. Wie allerdings z.B. Sovers et al. (2002) oder Schuh et al. (2004) berichten, beträgt der sog. WRMS (*weighted root mean square*) einer VLBI-Session typischerweise etwa 30 ps (≈ 0.9 cm).

Der Begriff eines *gewichteten* quadratischen Mittelwertes deutet an, daß die einzelnen Beobachtungen entsprechend ihrer formalen Fehler in der Ausgleichung Berücksichtigung finden. Das VLBI-Softwarepaket OCCAM geht laut Tesmer (2004) beispielsweise in zwei Schritten vor. Alle Beobachtungen, deren Residuen in einer ersten Lösung das Dreifache ihres mittleren Fehlers übersteigen, werden für die finale zweite Lösung mit einem relativ kleinen Gewicht versehen. In allen *Bernese*-Lösungen, die bislang in Kap. 3.3 vorgestellt wurden, sind dagegen alle

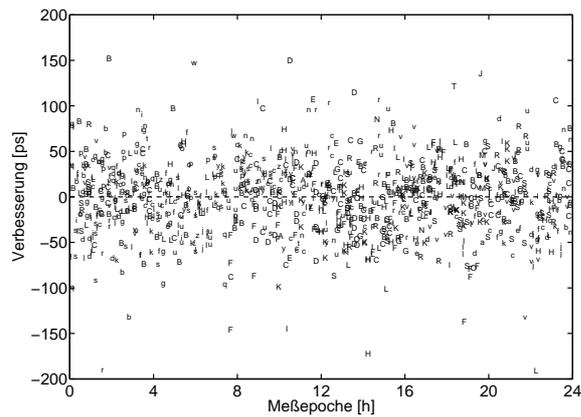


Abb. 3.1.: Verbesserungen [ps] der CONT02-Beobachtungen auf der Station Wettzell am Tag 290 (17. Oktober 2002). Mittlerer Gewichtseinheitsfehler (a posteriori) der gesamten Eintageslösung: $\hat{\sigma}_0 = 1.27 \text{ cm} \approx 42.3 \text{ ps}$. Gleiche Buchstaben bedeuten gleiche Quasare.

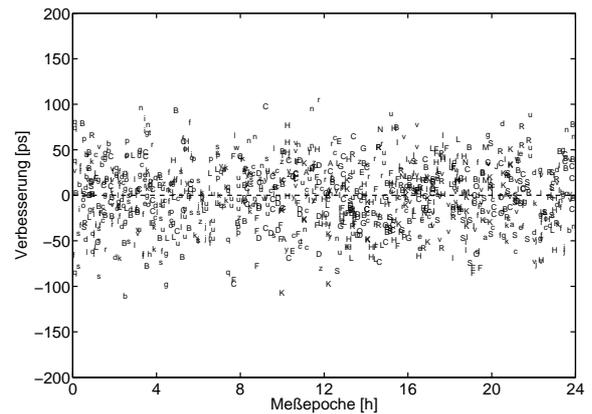


Abb. 3.2.: Verbesserungen [ps] der CONT02-Beobachtungen auf der Station Wettzell am Tag 290 (17. Oktober 2002) nach Elimination aller Beobachtungen mit $\hat{v} > 3 \text{ cm}$ aus einer ersten Lösung. Mittlerer Gewichtseinheitsfehler (a posteriori) der gesamten Eintageslösung: $\hat{\sigma}_0 = 1.08 \text{ cm} \approx 36.0 \text{ ps}$.

Beobachtungen gleich gewichtet. Lediglich diejenigen Beobachtungen, die bereits in den *NGS-Card*-Dateien als Ausreißer markiert sind, wurden für die Ausgleichung nicht berücksichtigt.

Die *Bernese GPS Software* verfügt zwar über Programme zur Erkennung von Ausreißern, eine Anpassung an die Verarbeitung von VLBI-Daten wurde jedoch bislang nicht vorgenommen. Um zu untersuchen, wie sich Ausreißer-Beobachtungen auf das Resultat auswirken, wurden alle Beobachtungen markiert, die in der Eintageslösung vom 17. Oktober 2002 ein Residuum von mindestens 3 cm ($\approx 100 \text{ ps}$) aufwiesen, und zwar ungeachtet ihres formalen Fehlers. Mit 100 Beobachtungen waren davon etwa 3% der Daten des Tages 290 betroffen. Eine Neuverarbeitung ohne Mitverwendung der „Ausreißer“ lieferte für die Station Wettzell die Residuen in Abb. 3.2. Mit einem mittleren Gewichtseinheitsfehler von 1.08 cm ($\approx 36.0 \text{ ps}$) kommt die *Bernese*-Lösung des Tages 290 dem von Schuh et al. (2004) angegebenen Wert von 30 ps damit schon recht nahe. Wie der Mittelwert von 1.3 cm aus Tab. 3.3 für alle 15 Eintageslösungen zeigt, ist Tag 290 dabei repräsentativ für die gesamte CONT02-Kampagne. Ein noch besserer Wert für $\hat{\sigma}_0$ wurde u.U. dadurch vergeben, daß die Daten in Blöcken von 0:00 bis 24:00 Uhr UT ausgewertet wurden. Durch die gemeinsame Verarbeitung von Daten aus verschiedenen VLBI-Sessions handelt man sich zusätzliche Probleme wie z.B. den notwendigen Uhrensprung an der Sessionsgrenze ein.

3.3.5. INT2-Residuen

Da für die CONT-Kampagnen ein beachtlicher personeller und logistischer Aufwand betrieben wird, können die CONT-Daten in etwa als Optimum dessen betrachtet werden, was im Hinblick auf die Datenmenge mit der heutigen VLBI-Technik möglich ist. In aller Regel liefern VLBI-Experimente allerdings weitaus geringere Datenmengen. Das kleinstmögliche VLBI-Experiment besteht aus zwei Teleskopen, die zeitgleich beobachten. Solche Messungen werden praktisch täglich zwischen Wettzell und Kokee Park (Hawaii; INT1) bzw. zwischen Wettzell und Tsukuba (Japan; INT2) zur Bestimmung von UT1 durchgeführt. Bei diesen sog. *Intensive*-Messungen werden während der Dauer von etwa einer Stunde nur ca. 20 Beobachtungen aufgezeichnet. Dies bedeutet, daß auch nur wenige Unbekannte geschätzt werden können. Laut Fischer et al. (2003) werden in der Regel zwei Uhrenparameter (Offset und Drift einer der beiden Stationsuhren), zwei Troposphärenparameter (TZD für beide Stationen) sowie ΔUT geschätzt, insgesamt also fünf Unbekannte.

Um das Verhalten der *Bernese GPS Software* bei geringer Datenmenge zu untersuchen, wurden alle INT2-Sessions zwischen Wettzell und Tsukuba aus dem Jahre 2002 verarbeitet. Da diese Beobachtungsreihe erst im Juli 2002 aufgenommen wurde, handelt es sich dabei lediglich um insgesamt 20 Experimente, die mit der K4-Technologie aufgezeichnet wurden (Fischer et al., 2003). Im Gegensatz zu den oben diskutierten CONT02-Auswertungen wurde die Auflösung der Troposphären- und Uhrenparameter auf 24 h reduziert. Bei der Uhr sind 2 Parameter pro Tag gleichbedeutend mit der Schätzung von Offset und Drift, bei der Troposphäre sorgt ein sog. relativer *Constraint* (Zwangsbedingung) dafür, daß die TZD-Werte zu Beginn und Ende des Tages identisch sind. Da darüberhinaus keine Troposphärengradienten zugelassen wurden, ist die Parametrisierung quasi identisch mit der von Fischer et al. (2003).

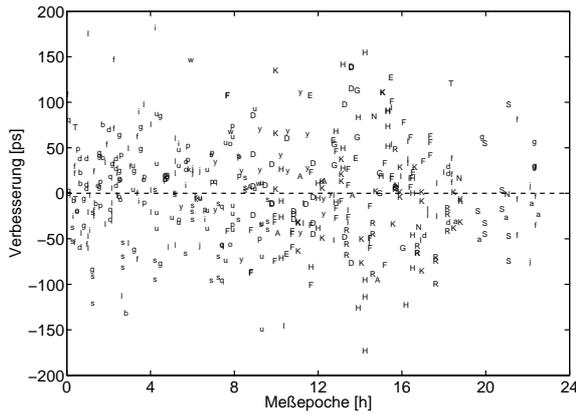


Abb. 3.3.: Verbesserungen [ps] der CONT02-Beobachtungen auf der Station Hartebeesthoek (Südafrika) am Tag 290 (17. Oktober 2002). Mittlerer Gewichtseinheitsfehler (a posteriori) der gesamten Eintageslösung: $\hat{\sigma}_0 = 1.27 \text{ cm} \approx 42.3 \text{ ps}$. Gleiche Buchstaben bedeuten gleiche Quasare.

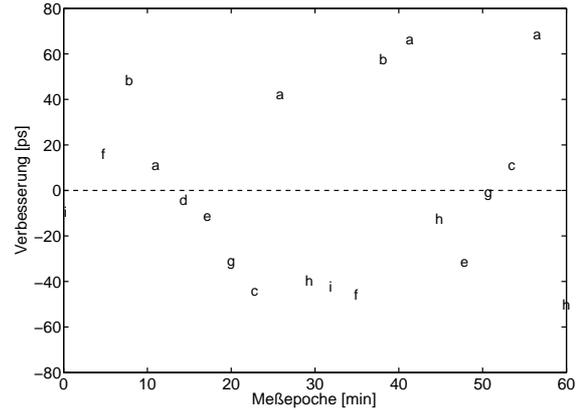


Abb. 3.4.: Verbesserungen [ps] der INT2-Beobachtungen zwischen Wettzell und Tsukuba am Tag 332 (28. November 2002). Mittlerer Gewichtseinheitsfehler (a posteriori): $\hat{\sigma}_0 = 1.25 \text{ cm} \approx 41.7 \text{ ps}$.

Zunächst einmal ist interessant, daß die INT2-Lösungen aufgrund der geringen Redundanz sehr anfällig auf Ausreißer reagieren. Die Lösungen für die Tage 252 und 262 zeigten mittlere Gewichtseinheitsfehler von mehreren cm, wenn nicht die Beobachtungen mit den größten Residuen von der Ausgleichung ausgeschlossen wurden. Wird dies berücksichtigt und werden außerdem alle ERP fixiert, so ergibt sich ein mittlerer Gewichtseinheitsfehler $\bar{\sigma}_0$ über alle 20 Tage von 1.26 cm ($\approx 42.0 \text{ ps}$; bei einer Streuung von 0.36 cm). Dies zeigt, daß die Qualität der INT2-Lösungen vergleichbar ist mit derjenigen der CONT02-Lösungen (vgl. Tab. 3.4). Als Beispiel zeigt Abb. 3.4 die Residuen für Tag 332 (28. November 2002).

Wird zusätzlich in jeder Eintageslösung ein Wert für ΔUT mitbestimmt, so sinkt $\bar{\sigma}_0$ gar auf 0.96 cm ($\approx 32.0 \text{ ps}$; Streuung: 0.29 cm) ab. Daß das Schätzen von ERP im Falle der INT2-Daten so großen Einfluß auf $\hat{\sigma}_0$ hat, während bei den CONT02-Daten kaum ein Effekt zu spüren war (vgl. Tab. 3.6), dürfte damit zusammenhängen, daß die in Ost-West-Richtung ausgerichtete Basislinie Wettzell – Tsukuba besonders sensitiv für ΔUT ist. Auch die zu beobachtenden Quasare werden mit dem Ziel ausgewählt, Beobachtungen mit möglichst großem ΔUT -Einfluß zu generieren, um ΔUT schließlich bestmöglich schätzen zu können.

Die mittlere Standardabweichung der ΔUT -Schätzwerte über alle 20 Tage beträgt $9.8 \mu\text{s}$, was dem von Fischer et al. (2003) angegebenen Wert von $8.8 \mu\text{s}$ recht nahe kommt, in den allerdings nur 19 Eintageslösungen eingeflossen sind. Ein Vergleich der geschätzten ΔUT -Werte mit unabhängigen Lösungen wird in Kap. 6.3 angestellt. An gleicher Stelle werden auch Troposphärenparameter und ERP aus den CONT02-Lösungen mit unabhängigen VLBI- sowie mit GPS-Lösungen verglichen.

4. Kombination geodätischer Raumverfahren

Neben der VLBI-Technik existiert eine Fülle weiterer geodätischer Raumverfahren, die allesamt einen Beitrag zur Beobachtung und Erforschung des Erdsystems leisten. Denselben Frequenzbereich wie die VLBI-Teleskope (Mikrowellen mit Frequenzen von ca. 10^8 bis 10^{11} Hz bzw. Wellenlängen von 1 m bis 1 mm) nutzen dabei alle globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS), das französische Dopplersystem DORIS (*Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite*), die Satellitenaltimetrie sowie die bildgebende SAR-Technik (*Synthetic Aperture Radar*) aus dem Bereich der Fernerkundung. Zu den GNSS zählen u.a. das amerikanische GPS (*Global Positioning System*), das russische GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) sowie das im Aufbau befindliche europäische Galileo. Im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums (ca. $4-8 \cdot 10^{14}$ Hz) arbeiten die Lasertechniken SLR (*Satellite Laser Ranging*) und LLR (*Lunar Laser Ranging*), mit deren Hilfe Abstandsmessungen zu Satelliten bzw. zum Mond durchgeführt werden. Informationen über das Schwerefeld der Erde liefern schließlich Satellitenmissionen wie CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) und GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*).

All diese Verfahren liefern Beiträge zu mindestens einer der „drei Säulen“ der *Space Geodesy* (Rothacher, 2003):

- Erfassung der Geometrie der Erdoberfläche (Kontinente, Ozeane) einschließlich ihrer Veränderungen
- Beobachtung der Stellung der Erdrotationsachse sowie der Rotationsgeschwindigkeit
- Erfassung des Erdschwerefeldes einschließlich seiner zeitlichen Änderungen

Die Grundlage für diese zentralen Aufgaben bilden wiederum hochgenaue, stabile erd- sowie raumfeste Bezugsrahmen, ohne die sich insbesondere zeitliche Änderungen nur schwer feststellen ließen. Der erdfeste Referenzrahmen ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) umfaßt Koordinaten und Geschwindigkeiten global verteilter Beobachtungsstationen, während Quasarkoordinaten die Grundlage des raumfesten ICRF (*International Celestial Reference Frame*) bilden. Zur Bestimmung dieser Bezugsrahmen sowie zur Beobachtung der Erdrotation, deren Parameter die Transformation zwischen erd- und raumfestem System erlauben, sind besonders die Techniken VLBI, SLR/LLR, GNSS und DORIS geeignet. Diese vier stellen somit die primären Beobachtungstechniken der *Space Geodesy* dar.

Im Laufe der vergangenen 15 Jahre wurden die wissenschaftlichen Aktivitäten im Bereich dieser Techniken in Form internationaler Dienste unter dem Dach der IAG (*International Association of Geodesy*) organisiert. So wurde im Jahre 1994 der *International GNSS Service* (IGS; Beutler et al., 1999; Dow et al., 2005) gegründet, gefolgt vom *International Laser Ranging Service* (ILRS; Pearlman et al., 2002) im Jahre 1998, dem *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry* (IVS; Schlüter et al., 2002; Schlüter und Behrend, 2007) im Jahre 1999 sowie dem *International DORIS Service* (IDS; Tavernier et al., 2006) im Jahre 2003. Die Analysezentren der einzelnen Dienste liefern Technik-Lösungen an den *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS), der schließlich Referenzrahmen und EOP ableitet.

Während die Anfangsjahre der einzelnen Dienste jeweils geprägt waren von einem Wettbewerb unter den Analysezentren ein und derselben Technik, was zu einem beträchtlichen Fortschritt in der Modellierung führte, wird mittlerweile vermehrt der Versuch unternommen, weitere Verbesserungen durch den Vergleich der Resultate unterschiedlicher Techniken zu erzielen. Insbesondere systematische Effekte, die durch die Instrumentierung oder die Meßanordnung einer bestimmten Technik hervorgerufen werden, lassen sich auf diese Weise aufdecken. Auch innerhalb des IERS vollzog sich ein Wechsel von teilweise „einfacher“ Mittelbildung, unabhängig für Referenzrahmen und EOP (s. Kap. 4.1.2), hin zu einer konsistenten kombinierten Schätzung aller Parameter unter Ausnutzung sämtlicher Korrelationen zwischen den Parametern (s. Kap. 4.2.1). Erst auf diesem Wege gelingt es, die Komplementarität der unterschiedlichen Raumverfahren, die z.B. von Rothacher (2002) oder Gambis (2004) veranschaulicht wird, voll auszunutzen.

Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen Verfahren bestehen auf Seiten der Signalempfänger auf der Erdoberfläche, beim Satelliten sowie im Parameterraum (Rothacher, 2002). Sind auf einer Beobachtungsstation zwei oder mehr Beobachtungstechniken vereint, lassen sich diese über die Vektoren zwischen den Referenzpunkten (*local ties*) verknüpfen. Ähnliches gilt, wenn ein Satellit mit Hilfe verschiedener Techniken beobachtet werden kann. Hier besteht die Möglichkeit, die Techniken über die genauen Offsets zwischen den Instrumenten an Bord des Satelliten zu kombinieren. So stehen beispielsweise für etliche LEOs verschiedene Möglichkeiten der

Bahnbestimmung zur Verfügung, einige GNSS-Satelliten tragen SLR-Reflektoren, und es bestünde theoretisch die Möglichkeit, GNSS-Signale mit Hilfe der VLBI-Teleskope aufzuzeichnen. Eine Kombination von Parametern in der Ausgleichung ist immer dann möglich, wenn mindestens zwei Techniken einen Beitrag zu diesen Unbekannten liefern können. Diese lassen sich noch unterscheiden in stationsspezifische Parameter, wie z.B. Korrekturen für die atmosphärische Refraktion oder die Stationsuhren, und in globale Parameter wie EOP, Satellitenbahnen oder das Geozentrum.

Ziel sollte sein, die Beobachtungen der verschiedenen Raumverfahren direkt in einem Softwarepaket zusammenzuführen, das die Auswertung aller Meßtechniken beherrscht, um sie dort gemeinsam zu verarbeiten. Diejenigen Parameter, zu denen zwei oder mehr Techniken einen Beitrag liefern, würden dann von Beginn an nur einmal aufgesetzt. Zwar existieren in der Zwischenzeit einige Softwarepakete wie z.B. GEOSAT (Andersen, 2007) oder GINS (Coulot et al., 2007), die zwei oder mehr Techniken implementiert haben, zumeist ist jedoch nicht die Modellierung aller Techniken auf dem Stand, den die führenden Analysezentren der entsprechenden Technik vorgeben (vgl. Kap. 4.3). Aus diesem Grund werden vom IERS bislang lediglich Normalgleichungen der verschiedenen Technik-Lösungen kombiniert (vgl. Kap. 4.2). Theoretisch sollten diese beiden Vorgehensweisen aus mathematischer Sicht zwar identisch sein, in der Praxis ist es jedoch schwierig, bei der Erzeugung der verschiedenen Lösungen die Verwendung konsistenter a priori-Korrekturmodelle sowie eine einheitliche Parametrisierung sicherzustellen (Rothacher, 2002).

4.1. Kombination von Zielparametern

Die wohl simpelste Methode, unterschiedliche Meßverfahren oder die Resultate verschiedener Analysezentren zu kombinieren, besteht in der Mittelung geschätzter Zielparameter. Hierzu liefert jedes Analysezentrum eine Lösung, welche die gewünschten Parameter samt deren Genauigkeitseigenschaften enthält. Letztere können bei der Mittelbildung zur Gewichtung der Einzellösungen verwendet werden. Die Festlegung der Gewichte erfolgt u.U. jedoch auch iterativ, was bedeutet, daß Einzelwerte, die stark vom Mittel abweichen, sukzessive an Gewicht verlieren. Dies dient insbesondere der Elimination von Ausreißern. Was bei der Mittelung jedoch nicht mehr berücksichtigt werden kann, sind Korrelationen mit anderen Parametern. Besteht die Aufgabe beispielsweise darin, verschiedene EOP-Lösungen zu kombinieren, so können die einzelnen Parameter lediglich isoliert voneinander gemittelt werden, während mögliche Korrelationen zwischen den Parametern nicht berücksichtigt werden können. Ein weiteres Problem der Kombination von „Endprodukten“ besteht darin, daß in der Regel niemand garantieren kann, daß die verschiedenen Lösungen konsistent geschätzt wurden. Es besteht zwar die Möglichkeit, Standards für die Programmierung, Parametrisierung und die zu verwendenden a priori-Korrekturmodelle vorzugeben, die Frage nach deren Einhaltung aber bleibt.

4.1.1. Technikinterne Bahnkombination des IGS

Als Beispiel für eine technikinterne Kombination von Zielparametern sei hier die Generierung der Bahnen für GNSS-Satelliten durch den IGS angeführt, die von Beutler et al. (1995) beschrieben wurde. Laut Dow et al. (2005) entsteht die offizielle IGS-Bahnlösung bis heute aus den entsprechend gewichteten Einzellösungen der Analysezentren, während andere IGS-Resultate (ERP, Stationskoordinaten) bereits einer Kombination von Normalgleichungen entstammen. Innerhalb des IGS verarbeiten momentan zehn Analysezentren die Daten unterschiedlicher Teile des globalen IGS-Stationsnetzes und liefern ihre Resultate an einen sog. Analysekoordinator. Dieser hat die Einhaltung der IGS-Standards zu überwachen sowie eine kombinierte IGS-Lösung zu generieren.

Bei der Mittelung der Einzellösungen erhält jedes Analysezentrum ein entsprechendes Gewicht. Dieses kann aus einem vorherigen Mittelungsschritt bzw. durch längerfristige Beobachtung der Bahnqualität eines bestimmten Analysezentrens gewonnen werden. Daneben müssen kleinere Unterschiede zwischen den Analysezentren in der Realisierung der Referenzrahmen berücksichtigt werden. Abweichungen in der geschätzten Position des Rotationspols der Erde werden durch eine Rotation der GNSS-Bahnebenen behoben, und zur Kompensation einer verbesserungsfähigen Realisierung des terrestrischen Bezugsrahmens werden die sieben Parameter einer Helmert-Transformation geschätzt (Beutler et al., 1995).

Dies zeigt, daß bei der Kombination versucht wird, bekannte Inkonsistenzen zwischen den Einzellösungen zu beheben. Ohne Zweifel wäre die bessere Variante, solche Unzulänglichkeiten von Beginn an zu vermeiden. Eine Kombination auf Beobachtungsebene (vgl. Kap. 4.3), die dies leisten könnte, scheidet im vorliegenden Fall jedoch aus. Die hohe Qualität der IGS-Produkte resultiert ja gerade aus der Vielzahl unabhängiger Softwarepakete mit unterschiedlichsten Ansätzen. Eine Kombination von Normalgleichungen mit voller Varianz-Kovarianz-Information

(vgl. Kap. 4.2) würde jedoch die korrekte Berücksichtigung von Korrelationen zwischen den verschiedenen Bahnparametern erlauben, die bei der „Mittelung“ keine Rolle spielen dürften. Außerdem wäre vermutlich leichter zu realisieren, daß auch die kombinierten Bahnen den Gesetzen der Physik gehorchen.

4.1.2. Technikübergreifende EOP-Kombination des IERS

Ein Beispiel für eine technikübergreifende Kombination von Zielparametern stellt die EOP-Kombination des IERS dar. In die C04-Lösung (*Combined 04*; Gambis, 2004) fließen EOP-Lösungen der Techniken VLBI, SLR und GPS ein. Lediglich im Falle von SLR handelt es sich dabei um die kombinierte Lösung des entsprechenden internationalen Dienstes (Bizouard und Gambis, 2007). Hauptsächlich aus Gründen schnellerer Verfügbarkeit werden in den übrigen Fällen die Lösungen einzelner Analysezentren vorgezogen. Die Kombination erfolgt ohne Berücksichtigung von Korrelationen (Rothacher, 2003) und bis vor kurzem auch völlig unabhängig von der Generierung der Referenzrahmen ICRF und ITRF (Rothacher, 2002). Dies führte zu einer langsamen, aber stetigen Verschlechterung der Konsistenz der zentralen Produkte des IERS. Zuletzt bestanden zwischen C04 und ITRF2000 Diskrepanzen von ca. 300 μs (Bizouard und Gambis, 2007).

Für die C04-Kombination werden die einzelnen Zeitreihen zunächst validiert, um die jeweiligen formalen Fehler skalieren zu können und dadurch vergleichbar zu machen. Bei der folgenden Mittelung über alle Werte innerhalb von täglichen Intervallen erfolgt dann eine Gewichtung nach den skalierten formalen Fehlern (Gambis, 2004). Damit wird also keinerlei Rücksicht auf Korrelationen zwischen den verschiedenen EOP genommen, und auch die Konsistenz zwischen EOP und ITRF bzw. ICRF läßt sich auf diese Weise nicht garantieren.

Das Problem der Konsistenz soll mit einer verbesserten Strategie gelöst werden, die bereits bei der Erzeugung neuer Zeitreihen unter der Bezeichnung „05 C04“ Berücksichtigung findet (Bizouard und Gambis, 2007). Dabei wird davon ausgegangen, daß die Nutationswerte der IVS-Lösung konsistent mit dem ICRF sind. Daneben finden die EOP-Zeitreihen aus der ITRF2005-Schätzung Verwendung, welche auf der Kombination von Normalgleichungen beruht (vgl. Kap. 4.2.1; Altamimi et al., 2007). Um Konsistenz mit ICRF bzw. ITRF zu erreichen, werden für die zu kombinierenden EOP-Zeitreihen Offset und Drift gegenüber der IVS-Lösung (Nutation) bzw. der ITRF2005-Lösung (UT1, Polbewegung) bestimmt und reduziert.

Da theoretisch gar keine Systematiken wie Trends zwischen den einzelnen Lösungen der verschiedenen Techniken vorhanden sein sollten (Rothacher, 2003), zeigt sich auch hier, daß der Weg über Zielparameter keineswegs optimal ist. Für manche Inkonsistenzen finden sich zwar Ansätze, diese zu beseitigen, doch ähnlich wie bei der IGS-Bahnkombination (Kap. 4.1.1) wäre es besser, solche von Beginn an zu vermeiden. Daß dies möglich ist, zeigte Altamimi et al. (2007) mit der konsistenten Schätzung von ITRF und EOP durch Kombination von Normalgleichungen vier verschiedener Raumverfahren. Diese Vorgehensweise, die erstmals zur Berechnung des ITRF2005 eingesetzt wurde, wird in Kap. 4.2.1 beschrieben.

4.2. Kombination von Normalgleichungen

Bei der Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate im Gauß-Markoff-Modell lassen sich die Zuschläge $\Delta\hat{\mathbf{x}}$ zu den Näherungswerten der Unbekannten nach folgender Gleichung berechnen (Thaller, 2008; Tesmer, 2004):

$$\Delta\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{w} \quad (4.1)$$

Dabei steht \mathbf{A} für die Jacobi-Matrix, welche die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichung nach den Unbekannten enthält, \mathbf{A}' für deren Transponierte, \mathbf{P} für die Gewichtsmatrix mit den stochastischen Eigenschaften der Beobachtungen und \mathbf{w} für den Widerspruchsvektor. Dieser repräsentiert die Differenz zwischen den Beobachtungen einerseits und dem mathematischen Modell, berechnet an der Stelle der Näherungswerte für die Unbekannten, andererseits (vgl. Kap. 3.2). Gleichung (4.1) wird auch als Normalgleichung mit der Normalgleichungsmatrix

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{A} \quad (4.2)$$

bezeichnet.

Liegen zwei *unkorrelierte* Beobachtungsvektoren \mathbf{b}_1 und \mathbf{b}_2 vor, die beide von denselben Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}$ abhängen, so gelten folgende Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{v}}_1 &= \hat{\mathbf{b}}_1 - \mathbf{b}_1 = \mathbf{A}_1 \Delta \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{w}_1 \\ \hat{\mathbf{v}}_2 &= \hat{\mathbf{b}}_2 - \mathbf{b}_2 = \mathbf{A}_2 \Delta \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{w}_2\end{aligned}\quad (4.3)$$

Faßt man alle Beobachtungen in einem Gleichungssystem zusammen, so erhält man mit

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix}$$

wiederum Gleichung (4.1) als Lösung für die Unbekannten. Gleichung (4.1) läßt sich infolgedessen auch schreiben als (Vermeer, 2007; Thaller, 2008)

$$\begin{aligned}\Delta \hat{\mathbf{x}} &= \left(\begin{bmatrix} \mathbf{A}'_1 & \mathbf{A}'_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_1 & \mathbf{A}'_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} \\ &= \left(\begin{bmatrix} \mathbf{A}'_1 \mathbf{P}_1 & \mathbf{A}'_2 \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_1 \mathbf{P}_1 & \mathbf{A}'_2 \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} \\ &= (\mathbf{A}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_2)^{-1} \cdot (\mathbf{A}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{w}_1 + \mathbf{A}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{w}_2)\end{aligned}\quad (4.4)$$

Anhand von Gleichung (4.4) kann man erkennen, daß sich aus unabhängigen Beobachtungssätzen allein durch Addition der entsprechenden Normalgleichungsmatrizen \mathbf{N} (vgl. Gleichung (4.2)) sowie der Vektoren $\mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{w}$ eine Gesamtlösung berechnen läßt. Ein solches Aufaddieren von Normalgleichungen wird auch als *stacking* (*to stack* = aufstapeln) bezeichnet. Brockmann (1997) zeigt, daß sich Normalgleichungen auch aus der Varianz-Kovarianz-Information rekonstruieren lassen. Dabei spielt insbesondere die Inverse von \mathbf{N} , die sog. Kofaktormatrix, eine Rolle. Aus mathematischer Sicht ist das Kombinieren von Normalgleichungen identisch zur gemeinsamen Auswertung aller Beobachtungen (vgl. Kap. 4.3). Wie sich später zeigen wird, ist jedoch auch das *stacking* mit einigen kleineren Nachteilen und Problemen verbunden.

Beide Verfahren sind allerdings der Kombination von Zielparametern (vgl. Kap. 4.1) weitaus überlegen und dieser nach Möglichkeit vorzuziehen. Dies gilt umso mehr, wenn nicht nur verschiedene Beobachtungssätze einer Technik, sondern solche verschiedener Raumverfahren kombiniert werden sollen. Eine Zusammenstellung der Vorteile liefern beispielsweise Andersen (2000) oder Rothacher (2002, 2003):

- Für alle Parameter, die mit mehr als einer Technik bestimmt werden können, gibt es nur einen Schätzwert. Insbesondere lassen sich z.B. ein einheitlicher Satz von EOP sowie gemeinsame Werte für die atmosphärische Refraktion ermitteln.
- Korrelationen zwischen unterschiedlichen Parametern lassen sich korrekt berücksichtigen (zu „stackende“ Einzellösungen werden allerdings als unkorreliert betrachtet). Dadurch besteht z.B. die Möglichkeit, Parameter wie ITRF und EOP konsistent zu schätzen. Daneben können Satellitenbahnen im langzeitstabilen ICRF realisiert werden, zu dem wiederum nur VLBI Zugang hat.
- Die Komplementarität der verschiedenen Raumverfahren läßt sich ausnutzen, was bedeutet, daß sich die Verfahren aufgrund ihrer spezifischen Stärken und Schwächen gegenseitig im Hinblick auf Genauigkeit, zeitliche Auflösung und zeitliche Verfügbarkeit ergänzen können. Während VLBI z.B. in der Lage ist, absolute Nutationswinkel in niedriger Auflösung zu liefern, können GNSS die Änderungsraten dieser Winkel mit hoher Auflösung bereitstellen. Verfügt eine Technik über eine schwache Netzgeometrie, kann dies durch andere Techniken kompensiert werden. Können zwei Parametertypen aufgrund hoher Korrelationen mit Hilfe einer Technik nicht getrennt werden, kann die Hinzunahme einer weiteren Technik u.U. helfen.
- Technikspezifische systematische Effekte, die sich u.a. in einem Offset oder einer Drift äußern können, lassen sich leichter von „echten“ geophysikalischen Signalen trennen. So existiert beispielsweise bis heute keine Erklärung für die Diskrepanz zwischen den aus GNSS- bzw. SLR-Beobachtungen abgeleiteten Satellitenbahnen (vgl. Kap. 5.2.6).
- Die Anhäufung mehrerer Techniken an einem Ort auf der Erde in Form sog. Fundamentalstationen läßt sich ausnutzen. So können die mit terrestrischen Verfahren gemessenen Vektoren zwischen den Referenzpunkten der verschiedenen Techniken (*local ties*) als zusätzliche Beobachtungen eingeführt werden. Außerdem können die Raumverfahren an diesen Orten über gemeinsame stationsabhängige Parameter wie die Korrektur der atmosphärischen Refraktion verknüpft werden.

- Die Bestückung eines Satelliten mit mehreren Techniken kann genutzt werden. So können die Vektoren zwischen den verschiedenen Instrumenten an Bord des Satelliten als (u.U. „fehlerfreie“) Beobachtungen aufgefaßt werden. Außerdem sollten alle Techniken eine identische Bahn für den entsprechenden Satelliten liefern.
- Der Umgang mit nichtlinearem Verhalten der Stationen (z.B. jährliche Signale und Diskontinuitäten wie Erdbeben oder Veränderungen an der Instrumentierung) wird erleichtert.

4.2.1. Normalgleichungen unabhängiger Analysezentren

Eingesetzt wird die Kombination von Normalgleichungen beispielsweise bei der Berechnung des terrestrischen Referenzrahmens ITRF. Bereits das ITRF2000 (Altamimi et al., 2002) war zu seiner Zeit das am weitesten entwickelte Produkt des IERS, da Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten unter Ausnutzung der vollen Varianz-Kovarianz-Information der einzelnen Techniklösungen kombiniert wurden (Rothacher, 2003). Eine Konsistenz mit den EOP-Produkten des IERS konnte allerdings erst mit dem ITRF2005 (Altamimi et al., 2007) erreicht werden, da hier langjährige Zeitreihen der Stationskoordinaten und EOP gemeinsam ausgewertet wurden. Zur Verarbeitung der Normalgleichungen bzw. Varianz-Kovarianz-Matrizen der Techniken GNSS, VLBI, SLR und DORIS wurde das Softwarepaket CATREF (*Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames*) eingesetzt. Die technikspezifischen Lösungen, die bis auf DORIS von den entsprechenden internationalen Diensten stammten, lagen im SINEX-Format (*Solution Independent Exchange Format*) vor.

Bei der gemeinsamen Ausgleichung wurden die terrestrisch gemessenen Vektoren zwischen den Referenzpunkten der Instrumente an Stationen mit mindestens zwei Techniken als zusätzliche Beobachtungen eingeführt. Deren Qualität stellte sich jedoch als relativ heterogen heraus. Daneben wurde ein gemeinsamer Satz von ERP geschätzt, allerdings mit der Einschränkung, daß zur Bestimmung von ΔUT sowie dessen zeitlicher Änderung allein die VLBI-Beobachtungen verwendet wurden, obwohl auch hier eine Kombination mit den Satellitentechniken möglich wäre, wie Thaller et al. (2007) zeigen konnten. Eine Schätzung von Nutationswerten erfolgte nicht. Für alle auf einer Station versammelten Techniken wurde eine gemeinsame Stationsgeschwindigkeit ermittelt, eine Kombination von Atmosphärenparametern oder Stationsuhren erfolgte dagegen nicht. Auch die Konsistenz mit dem ICRF kann nicht garantiert werden.

Bei der Kombination von Normalgleichungen muß man sich darauf verlassen, daß zu deren Erzeugung identische a priori-Korrekturmodelle verwendet wurden. Daß dies in der Praxis jedoch nicht unbedingt der Fall sein muß, zeigt die bei der Berechnung des ITRF2005 aufgetretene Maßstabsdiskrepanz zwischen VLBI und SLR. Während der Maßstab des ITRF2000 noch gleichberechtigt durch diese beiden Raumverfahren realisiert wurde, stellten Altamimi et al. (2007) für die Epoche 2000.0 einen Versatz von 1 ppb sowie eine Änderungsrate von 0.08 ppb/a zwischen diesen beiden Verfahren fest. Hierfür sind mehrere Ursachen denkbar. Neben der unzureichenden Verteilung von VLBI- und SLR-Stationen, Unzulänglichkeiten in den Vektoren zwischen den entsprechenden Referenzpunkten oder systematischen Effekten könnten sich auch Inkonsistenzen in den a priori-Korrekturmodellen auf den Maßstab des Stationsnetzes auswirken.

4.2.2. Normalgleichungen eng kooperierender Analysezentren

Um Probleme mit inkonsistenten Korrekturmodellen oder Parametrisierungen zu vermeiden, arbeiteten die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der TU München und das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut (DGFI) eng zusammen, um für den Zeitraum der zweiwöchigen VLBI-Kampagne CONT02 (vgl. Kap. 6.1) konsistente Normalgleichungen für VLBI und GPS zu erhalten und Kombinationsstudien betreiben zu können (Krügel et al., 2004; Thaller et al., 2005a,b). In enger Kooperation wurden dazu das am DGFI verwendete VLBI-Softwarepaket OCCAM (Titov et al., 2001, 2004) und die an der FESG eingesetzte *Bernese GPS Software* (Hugentobler et al., 2001; Dach et al., 2007) im Hinblick auf Modellierung, Implementierung und Parametrisierung detailliert abgeglichen. Dadurch war eine möglichst übereinstimmende Auswertestrategie gewährleistet, was für die offiziellen Lösungen von IGS und IVS nicht in dem Maße gilt.

Ausgewertet wurden die kontinuierlichen VLBI-Daten der CONT02-Kampagne sowie die Beobachtungsdaten von ca. 150 IGS-Stationen desselben Zeitraumes. Es konnte gezeigt werden, daß sich die Wiederholbarkeit der geschätzten Stationskoordinaten verbessert, wenn die beiden Raumverfahren über die lokalen Vektoren zwischen ihren Referenzpunkten verknüpft werden (Thaller et al., 2005b). Statt über den Höhenunterschied zwischen den zwei Instrumenten auf einer Station kann die Verknüpfung alternativ auch über die aufgrund des Höhenunterschiedes zu erwartende Differenz in der troposphärischen Refraktion vorgenommen werden (Thaller et al., 2005a; Krügel et al., 2007). Dies ist insbesondere dann von Interesse, wenn der Höhenunterschied nicht in ausreichender Genauigkeit vorliegt.

Krügel et al. (2007) konnten zeigen, daß es möglich ist, sowohl die troposphärische Zenitverzögerung (TZD) als auch die Troposphärengradienten (vgl. Gleichung (2.17)) zu kombinieren. Größtes Problem bei der TZD-Kombination sind systematische Differenzen, die auch nach Berücksichtigung des Höhenunterschieds zwischen VLBI- und GPS-Antenne verbleiben, und die zumindest teilweise auf die Verwendung von Radomen zurückzuführen sind, mit denen GPS- und/oder VLBI-Antennen vor Umwelteinflüssen geschützt werden sollen (vgl. Kap. 4.5). Laut Steigenberger et al. (2007) sind solche systematischen Differenzen auch zwischen redundanten GPS-Antennen zu beobachten, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft auf einer Station befinden und eigentlich identische Atmosphärenparameter liefern sollten. Systematische Differenzen in den Gradienten können auch Hinweise auf fehlerhafte Komponenten in den Koordinatenvektoren zwischen den einzelnen Instrumenten liefern (Krügel et al., 2007).

Thaller et al. (2007) konnten durch die Kombination der VLBI- und GPS-Normalgleichungen belegen, daß es möglich ist, den vollständigen Satz der EOP zu kombinieren. Da GPS aufgrund von Korrelationen mit den Satellitenbahnparametern für sich genommen nicht in der Lage ist, Absolutwerte für die Nutationswinkel sowie für ΔUT zu liefern, zeigt sich an diesem Beispiel der Fortschritt gegenüber der Kombination von Zielparametern (vgl. Kap. 4.1) besonders deutlich. Die kombinierte Lösung entspricht dabei nicht einfach nur der Lösung der VLBI, die als mehr oder weniger einziger Zugang zu diesen Parametern besitzt (Rothacher, 2002). Vielmehr sorgen die Änderungsdaten, die GPS für die entsprechenden Parameter liefern kann, für eine Stabilisierung der Lösung.

Der größte Gewinn für eine kombinierte Lösung dürfte allerdings in der Möglichkeit bestehen, die zeitliche Auflösung gegenüber der VLBI-Lösung zu steigern. Während die VLBI-Beobachtungen das absolute Niveau der zu schätzenden Parameter bestimmen, können die kontinuierlichen GPS-Beobachtungen mittels der Änderungsdaten für eine vernünftige Auflösung sorgen. Damit würden sich die beiden Verfahren dann im Hinblick auf Genauigkeit, zeitliche Auflösung und Netzgeometrie ideal ergänzen. Kombinierte EOP können darüber hinaus, ähnlich wie die Troposphärengradienten, zur Validierung der Koordinatenvektoren zwischen den Referenzpunkten beitragen (Thaller et al., 2007).

4.2.3. Normalgleichungen unabhängiger Programme eines Analysezentrum

Ist das Know-how für verschiedene Raumverfahren an einer einzigen Institution vorhanden, sollte eine Generierung konsistenter Normalgleichungen ebenfalls zu erreichen sein. Als Beispiel sei hier das *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) angeführt, an dem u.a. auch Softwarepakete zur Auswertung von GNSS- und VLBI-Beobachtungen entwickelt wurden. Für die Verarbeitung von VLBI-Daten steht das Programmpaket CALC/SOLVK zur Verfügung, GPS-Auswertungen sind mit GAMIT (*GPS at MIT*) möglich (Feigl et al., 1993). Eine Kombination verschiedener Raumverfahren kann schließlich mit dem Paket GLOBK (*Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program*; Herring et al., 2006) vorgenommen werden, das die Kovarianz-Matrizen der geschätzten Parameter nutzt. Kombinieren lassen sich bislang Stations- und Quasarkoordinaten, Bahnparameter sowie EOP.

Feigl et al. (1993) kombinierten GPS- und VLBI-Beobachtungen lokaler und globaler Netze aus einem Zeitraum von 7 Jahren, um Stationsgeschwindigkeiten für Kalifornien abzuleiten. Für Stationen, die mit beiden Techniken besetzt worden waren, wurden bei der Koordinatenlösung sowohl die Vektoren zwischen den Referenzpunkten berücksichtigt als auch eine einheitliche Stationsgeschwindigkeit erzwungen. In einer separaten Geschwindigkeitslösung wurde hingegen auf die lokal bestimmten Vektoren verzichtet. Dong et al. (1998) nutzten GLOBK, um GPS mit elektronischen Distanzmessungen (EDM) zu kombinieren. Beide Meßverfahren wurden später noch mit VLBI-Beobachtungen kombiniert, um Geschwindigkeitslösungen für das *Southern California Earthquake Center* (SCEC) abzuleiten. Zu aktuellen Kombinationsstudien ist dagegen nichts bekannt.

4.3. Kombination von Beobachtungen

Möchte man direkt die Beobachtungsdaten verschiedener Raumverfahren kombinieren, so muß das dazu verwendete Softwarepaket in der Lage sein, all diese Daten zu verarbeiten. Nahezu alle der heute eingesetzten Programme dürften zunächst für die Auswertung der Daten einer bestimmten Technik entwickelt worden sein. Die größte Schwierigkeit bei der Ergänzung der Software durch weitere Meßverfahren liegt darin, den Entwicklungsvorsprung der speziell für das zu ergänzende Verfahren entwickelten Softwarepakete einzuholen. Dies ist zwar keine zwingende Voraussetzung für die Kombination, ihr Sinn und Zweck ist jedoch in Frage gestellt, wenn für die Einzeltechniken nicht eine zumindest annähernd mit den „führenden“ Softwarepaketen vergleichbare Genauigkeit erzielt werden kann.

Eine Kombination auf dem Niveau der Beobachtungen erscheint sehr naheliegend, gleichwohl ist sie nur sehr schwer zu realisieren. Eine konsistente Bestimmung aller „drei Säulen“ (Geometrie, Erdrotation, Schwerefeld) durch Kombination sämtlicher Beobachtungsverfahren ist aus heutiger Sicht nicht realistisch (Rothacher, 2003). Wie im folgenden gezeigt wird, existieren jedoch bereits erste Programme, die zumindest in der Lage sind, erd- und raumfesten Referenzrahmen sowie EOP konsistent aus den Beobachtungen der primären Techniken VLBI, GNSS, SLR und DORIS zu schätzen. Dabei können zwei grundlegende Strategien unterschieden werden: Verarbeitung aller Beobachtungen in einem Programmlauf oder getrennte Verarbeitung der verschiedenen Techniken mit ein und derselben Software bei anschließender Kombination von Normalgleichungen.

Einige der Vorteile der Kombination von Beobachtungen im Vergleich zur Kombination von Normalgleichungen finden sich in Andersen (2000) und Rothacher (2002):

- Wird ein und dasselbe Programmpaket zur Verarbeitung der Beobachtungsdaten verschiedener Techniken eingesetzt, ist die Wahrscheinlichkeit weitaus größer, daß die verwendeten Fundamentalkonstanten, a priori-Korrekturmodelle und Auswertestrategien sowie die Parametrisierung der Unbekannten konsistent sind. Da in aller Regel verschiedene Programmteile durchlaufen werden, kann dies allein jedoch auch noch keine Garantie sein. Da Softwarepakete permanent weiterentwickelt werden, ist man bei der Kombination von Normalgleichungen dagegen nahezu auf verlorenem Posten.
- Die Kombination von Beobachtungen zeigt klare Vorteile, wenn eine große Zahl unbekannter Parameter kombiniert werden soll. Parameter, die nur für eine Epoche gelten, wie z.B. Empfängeruhrkorrekturen, kinematische Koordinaten oder stochastische Ionosphärenparameter, müssen in der Regel vor der Lösung bzw. Speicherung des Normalgleichungssystems aus diesem eliminiert werden, um nicht an die Grenzen der Rechenleistung zu stoßen (Dach et al., 2007). Deren Einfluß auf die übrigen Parameter wird dabei zwar korrekt modelliert, für eine mögliche Kombination von Normalgleichungen stehen die eliminierten Parameter allerdings nicht mehr zur Verfügung.
- Die individuelle Gewichtung einzelner Beobachtungen wird erleichtert. Denkbar sind u.a. Gewichtungen in Abhängigkeit der Station, des beobachteten Zieles, der Basislinienlänge oder des Elevationswinkels, unter dem das entsprechende Ziel beobachtet wird (z.B. Jin et al., 2005; Dach et al., 2007).
- Softwarepakete, die mehrere Beobachtungstechniken beherrschen, können ihre volle Stärke dann ausspielen, wenn diese Techniken auch in der Realität kombiniert werden. Würden beispielsweise die Signale der GNSS-Satelliten, die sich im Gegensatz zu den Quasaren bewegen, mit VLBI-Teleskopen aufgezeichnet (Petrachenko et al., 2004), wäre eine Auswertung nur mit einem Programm möglich, in dem die VLBI-Beobachtungstechnik *und* die GNSS-Satellitenbahnen modelliert sind. Dasselbe gilt für ein die Erde umkreisendes VLBI-Teleskop (*VLBI in space*), dessen Bahn mit Hilfe von GNSS bestimmt wird. Eine konsistente Verarbeitung wird jedoch dadurch erschwert, daß im Falle von VLBI die eigentliche Observable erst im Korrelator generiert wird. Bei der ersten satellitengestützten VLBI-Mission HALCA (*Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy*; Hirabayashi et al., 2000) erfolgte die Bahnbestimmung durch Dopplermessungen (Frey et al., 2002). Für die Nachfolgemission VSOP-2 (*VLBI Space Observatory Programme*; Hirabayashi et al., 2004) sind GNSS-Empfänger vorgesehen.

4.3.1. GINS/DYNAMO

Eines der wenigen Programme, das mehrere Beobachtungstechniken verarbeiten kann, ist das von der *Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale* (GRGS) entwickelte Programmpaket GINS/DYNAMO (*Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées*). Nachdem mit diesem bereits Meßverfahren verarbeitet werden konnten, die auf Winkelmessungen (optische Verfahren), Entfernungsbeobachtungen (SLR, LLR, GNSS, PRARE (*Precise Range and Range-Rate Equipment*), Altimetrie) oder Dopplermessungen (DORIS, PRARE) beruhten, wurde schließlich auch VLBI implementiert (Meyer et al., 2000; Bourda et al., 2007). Dies bedeutet, daß das Programmpaket alle der zu Beginn dieses Kapitels genannten primären Beobachtungstechniken abdeckt. Was GNSS und VLBI betrifft, reichen die GINS-Lösungen qualitativ bislang jedoch nicht an die entsprechenden spezialisierten Softwarepakete heran (Coulot et al., 2007).

Die unterschiedlichen Raumverfahren werden nicht innerhalb eines Programmlaufs verarbeitet, sondern zunächst jeweils individuell mit Hilfe von GINS. Die daraus resultierenden Normalgleichungen werden anschließend mit dem Programm DYNAMO kombiniert. Genaugenommen handelt es sich also auch hier wieder um eine Kombination von Normalgleichungen. Da im Unterschied zu den in Kap. 4.2 genannten Beispielen allerdings jeweils dasselbe Programm zum Aufstellen der Normalgleichungen verwendet wird, kommt die Vorgehensweise der GRGS einer Kombination von Beobachtungen bereits weitaus näher. Sind Korrekturmodelle und Parametrisierung konsistent,

besteht mathematisch eigentlich kein Unterschied mehr, es können jedoch nicht alle der in obiger Zusammenstellung genannten Vorteile der Kombination von Beobachtungen genutzt werden.

Yaya (2002) kombinierte die Beobachtungen von fünf Techniken (VLBI, GPS, SLR, DORIS, LLR) über einen Zeitraum von 3 Monaten, um einen gemeinsamen Satz von EOP zu schätzen. Die Vektoren zwischen Referenzpunkten an Beobachtungsstationen mit mehr als einer Technik wurden dabei nicht berücksichtigt, weswegen die Schätzung der Stationskoordinaten nicht von der gemeinsamen Verarbeitung profitieren konnte. Unter den individuellen EOP-Lösungen zeigte VLBI die beste Übereinstimmung mit der C04-Lösung des IERS. Im Vergleich zu GPS, SLR und DORIS war die zeitliche Auflösung der VLBI-Polkoordinaten jedoch verhältnismäßig bescheiden (wöchentliche Experimente in Kombination mit täglichen *Intensive*-Messungen zur ausschließlichen Bestimmung von ΔUT). Durch Kombination aller Meßverfahren gelang es, die Auflösung gegenüber der VLBI-Lösung deutlich zu steigern, ohne dabei nennenswert an Genauigkeit im Vergleich zu C04 einzubüßen. Für die Zeitreihen der kombinierten Polkoordinaten konnten die GPS-Beobachtungen den größten Beitrag liefern, die VLBI-Messungen sorgten v.a. für Stabilität (Yaya, 2002).

Coulot et al. (2007) weiteten die Untersuchungen auf den Zeitraum eines Jahres aus, indem sie GPS-, SLR-, VLBI- und DORIS-Beobachtungen des Jahres 2002 verarbeiteten. Eine Kombination der troposphärischen Parameter konnte dabei nicht realisiert werden. In den Normalgleichungen, die mit DYNAMO kombiniert wurden, waren nur ERP, Stationskoordinaten sowie SLR *range biases* (Husson, 2003) als unbekannte Parameter enthalten, während Bahnparameter, atmosphärische Verzögerungen sowie alle übrigen Parameter bereits vorab eliminiert wurden. Da keine Vektoren zwischen Referenzpunkten (*local ties*) berücksichtigt wurden, erfolgte die Kombination im Parameterraum praktisch ausschließlich über die gemeinsam geschätzten ERP. Da jedoch alle ERP ohne Änderungsraten bestimmt wurden, und damit außer VLBI keine der Techniken einen Beitrag zur Bestimmung von ΔUT liefern konnte, beschränkten sich die gemeinsamen Parameter auf die beiden Polkoordinaten.

Laut Coulot et al. (2007) ist die Genauigkeit ihrer SLR- und DORIS-Lösungen gut, die GPS- und VLBI-Lösungen erreichen dagegen nicht das Niveau der international besten Lösungen. Im Falle von GPS äußert sich dies im Vergleich zu den IGS-Analysezentren in 2–3 mal schlechteren Satellitenbahnen, was auch damit zusammenhängt, daß aufgrund begrenzter Rechenkapazität lediglich ein Netz von 72 GPS-Stationen prozessiert werden konnte. Im wesentlichen konnten die Erkenntnisse von Yaya (2002) bestätigt werden: ΔUT wird in der Kombination von VLBI dominiert, die Polbewegung dagegen von den GPS-Beobachtungen; die Polkoordinaten werden in der Kombinationslösung etwas genauer, ΔUT ein wenig schlechter. Aufgrund verschiedenster Einschränkungen (Nutation nicht geschätzt, keine ERP-Raten, keine *local ties*, Troposphäre nicht kombiniert) kann man aber wohl davon ausgehen, daß die Vorteile einer Kombination der verschiedenen Meßtechniken mit dem Programm GINS bei weitem noch nicht ausgeschöpft werden können.

4.3.2. GEOSAT

Coulot et al. (2007) behaupten, mit GINS weltweit das einzige Softwarepaket zur Verfügung zu haben, mit dem alle Beobachtungsverfahren verarbeitet werden können, die einen Beitrag zu den Produkten des IERS liefern. Denselben Anspruch erhebt jedoch auch Andersen (2000) für sein Programmpaket GEOSAT. Dieses ist wohl auch tatsächlich das einzige, mit dem alle Verfahren auf Beobachtungsniveau kombiniert werden können. Das ursprüngliche Programm zur Bahnbestimmung von Satelliten (Andersen, 1986, 1995) wurde später noch durch VLBI ergänzt (Andersen und Rekkedal, 1995). Die Software wird zwar bis heute weiterentwickelt (Andersen, 2007), sie ist jedoch aus verschiedenen Gründen (militärischer Träger, mangelnde Ressourcen für Vertrieb und Support) nicht frei verfügbar. Das *Forsvarets Forskningsinstitut* (FFI, *Norwegian Defence Research Establishment*), an dem die Software beheimatet ist, liefert zwar technikspezifische GEOSAT-Lösungen an IVS und ILRS, ein Nachweis der Wirkungsweise der Kombination von Beobachtungen steht dagegen bis heute aus.

4.3.3. Bernese GPS Software

Auch mit der *Bernese GPS Software* konnten bereits vor der Implementierung der VLBI (vgl. Kap. 3) verschiedene Raumverfahren kombiniert werden. Neben den verschiedenen GNSS konnten bereits auch SLR-Daten verarbeitet werden (Dach et al., 2007). Urschl et al. (2007) kombinierten GPS-, GLONASS- und SLR-Beobachtungen eines 41-tägigen Zeitraums im Jahre 2004. Da die verschiedenen Techniken zunächst getrennt verarbeitet wurden, um anschließend die mit demselben Programm erzeugten Normalgleichungen zu kombinieren, ähnelt die Vorgehensweise derjenigen der GRGS mit dem Programm GINS (Coulot et al., 2007). Gemeinsame Parameter bei der Kombination von GNSS und SLR sind Satellitenbahnparameter, ERP, die Position des Geozentrums sowie die Koordinaten derjenigen Stationen, die über beide Techniken verfügen.

Da Urschl et al. (2007) den Einfluß von SLR-Beobachtungen auf die Bahnen von GNSS-Satelliten untersuchen wollten, wurden alle Parameter außer den Bahnparametern auf konsistente a priori-Werte fixiert. Da nur zwei GPS-Satelliten einen SLR-Retroreflektor tragen (vgl. Kap. 5.2.6) und nur drei der GLONASS-Satelliten regelmäßig vom ILRS beobachtet werden, beschränkte sich die Zahl gemeinsamer Parameter auf die Bahnparameter dieser fünf Satelliten. Aufgrund der weitaus größeren Zahl an GNSS-Beobachtungen müssen die Laserabstandsmessungen bei der Kombination entsprechend gewichtet werden, um eine Veränderung der GNSS-Bahnen registrieren zu können. Da außerdem zwischen GNSS und SLR ein systematischer Fehler in radialer Richtung auftritt, für den es bislang keine ausreichende Erklärung gibt (vgl. Kap. 5.2.6), müssen bei der Kombination zusätzliche Unbekannte wie Reflektoroffsets oder *range biases* eingeführt werden. Andernfalls äußern sich die systematischen Fehler in einer Deformation der Bahnen, was sich beispielsweise in deutlich erhöhten Inkonsistenzen an den Tagesgrenzen äußert. Auf der anderen Seite schwächen die Hilfsparameter jedoch auch den Einfluß der SLR-Messungen auf das Resultat der Kombination.

4.3.4. EPOS-OC

Auch das Programm EPOS-OC (*Earth Parameters and Orbit Determination System - Orbit Computation*) des GeoForschungsZentrums Potsdam (GFZ) ist in der Lage, GNSS- und SLR-Beobachtungen zu kombinieren (neben DORIS, PRARE, K-Band- und Dopplermessungen, optischen Beobachtungen u.a.; Zhu et al., 2004). Laut Zhu et al. (2003b, 2004) ist dazu auch kein Umweg über die Normalgleichungen erforderlich. Zhu et al. (1997) konnten zeigen, daß die Bahnen der zwei mit Retroreflektoren ausgestatteten GPS-Satelliten für zwei einzelne Tage im Jahre 1995 im Überlappungsbereich deutlich besser übereinstimmten, wenn zusätzlich SLR-Beobachtungen mitberücksichtigt wurden. Vermutlich aufgrund der verhältnismäßig schlechten Qualität damaliger GPS-Lösungen (vgl. Steigenberger et al., 2006) war dabei weder eine unrealistische Gewichtung der SLR-Beobachtungen noch eine Behandlung des systematischen radialen Fehlers zwischen SLR und GPS vonnöten (vgl. Urschl et al., 2007). Bei einer kombinierten Bahnbestimmung aus GPS- und SLR-Daten für die GRACE-Satelliten mit Daten aus dem Jahr 2002 zeigte sich dagegen ebenfalls das Problem einer sinnvollen Gewichtung der beiden Techniken (Zhu et al., 2003b).

4.3.5. Probleme

Leider spielt die direkte Kombination von Beobachtungen verschiedener Raumverfahren in der geodätischen Praxis bis heute keine besondere Rolle. Laut Altamimi et al. (2006) ist sie aber trotz der zahlreichen großen Schwierigkeiten dasjenige Ziel, das es zu erreichen gilt. Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit seien im folgenden einige der Schwierigkeiten und Probleme aufgelistet, die zum Teil in abgeschwächter Form auch auf die beiden anderen Kombinationsansätze zutreffen:

- Die Zahl der Softwarepakete, die zu einer Kombination von Beobachtungen in der Lage sind, ist beschränkt. Schwierig ist vor allem, mit allen implementierten Beobachtungstechniken internationales Niveau zu erreichen.
- Fehler in der Software, die sich auf alle Techniken gleichartig auswirken, sind u.U. schwieriger aufzudecken. Unerlässlich bleiben also auch hier Vergleiche mit unabhängigen Softwarepaketen.
- Unterscheidet sich die Beobachtungsanzahl zwischen den Techniken um mehrere Größenordnungen, muß u.U. die Gewichtung der einzelnen Techniken angepaßt werden.
- Systematische Effekte zwischen den verschiedenen Techniken (vgl. Kap. 4.5) treten zwar offener zutage, bis entsprechende Ursachen gefunden sind, müssen jedoch Hilfsparameter (zusätzliche Offset- oder Driftparameter) eine Verformung der Lösung verhindern.
- Die Qualität der lokal vermessenen Vektoren zwischen den Referenzpunkten unterschiedlicher Techniken (*local ties*) ist sehr unterschiedlich. Häufig liegt die zugehörige Varianz-Kovarianz-Information nicht vor. Offen ist auch die Frage nach der zeitlichen Stabilität dieser Vektoren, die wohl nur durch regelmäßige Wiederholungsmessungen beantwortet werden könnte.
- Während bei der Verarbeitung von GNSS-Daten Bahnbögen von 1–3 Tagen üblich sind, werden bei SLR- oder DORIS-Auswertungen in der Regel längere Bögen modelliert (Zhu et al., 2003b).
- Sollen Beobachtungsdaten über einen längeren Zeitraum verarbeitet und kombiniert werden, was im Falle von VLBI unerlässlich (vgl. z.B. Vennebusch et al., 2007), für GNSS-Daten immerhin möglich ist (vgl. Steigenberger et al., 2006), so reicht die entsprechende Kombinationssoftware allein nicht aus. Zusätzlich muß hier das gesamte Datenmaterial samt aller Veränderungen an den Stationen sowie am Beobachtungssystem beherrscht werden.

Daneben gibt es eine Reihe von Punkten, welche die Kombination der verschiedenen Raumverfahren generell erschweren (Altamimi et al., 2003, 2006). Dazu zählt z.B., daß einige der Techniken nur über eine unzureichende Stationsverteilung verfügen, was v.a. auf die Südhalbkugel zutrifft. Infolgedessen existieren auch zu wenige Stationen, mit deren Hilfe SLR, VLBI und DORIS zumindest paarweise über gleichzeitige Beobachtungen verknüpft werden könnten. Ein großes Problem stellen auch ständige Veränderungen an der Instrumentierung dar, sofern sich diese auf die Position des Referenzpunktes auswirken.

4.4. Global Geodetic Observing System GGOS

Sämtliche Bestrebungen, die geodätischen Raumverfahren zu kombinieren, münden derzeit in der Einrichtung eines integrierten globalen Beobachtungssystems durch die IAG. Wichtige Weichenstellungen für ein *Integrated Global Geodetic Observing System* (IGGOS) erfolgten bereits 1998 auf einem Symposium in München (Rummel et al., 2000), die Anerkennung als offizielles IAG-Projekt erfolgte dann 2003 auf der IUGG-Generalversammlung in Sapporo (Andersen, 2004) und die Anerkennung als offizielle IAG-Komponente schließlich im Jahre 2007 (Tóth, 2007). Das mittlerweile in *Global Geodetic Observing System* (GGOS) umbenannte Beobachtungssystem soll alle geodätischen Meßtechniken und damit alle internationalen Dienste der IAG vereinen. Während sich die Geodäsie bislang auf die Erforschung individueller Prozesse beschränkte, soll mit GGOS die Integration aller „drei Säulen“ der Geodäsie (Geometrie, Erdrotation, Schwerefeld; s. oben) gelingen (Rummel et al., 2005), was weit über die in den vorangegangenen Kapiteln diskutierte Kombination der primären Beobachtungstechniken hinausgeht. An eine direkte Kombination der teilweise sehr unterschiedlichen Beobachtungstypen (vgl. Kap. 4.3) ist dabei also zunächst nicht zu denken. Ziel ist es, die zeitlichen und räumlichen Veränderungen der „drei Säulen“ mit einer Genauigkeit von $1 \text{ ppb} = 10^{-9}$ zu erfassen.

Die Entwicklung macht jedoch bei GGOS nicht Halt. Um für zukünftige politische Entscheidungen, vor allem im Hinblick auf globale Klimaveränderungen, besser gerüstet zu sein, sollen sämtliche Erdbeobachtungen besser koordiniert werden (Plag, 2008). Die Diskussion um den globalen Klimawandel zeigte deutlich auf, daß das bislang vorliegende Datenmaterial der verschiedensten Disziplinen insgesamt nicht zufriedenstellend ist. Die jeweiligen Stationsnetze sind sehr inhomogen, und sie verändern sich ständig. Manche Meßsysteme arbeiten nicht permanent, sondern werden nur für bestimmte Kampagnen eingesetzt, wieder andere kommen womöglich nur einmalig für ein bestimmtes Forschungsprojekt zum Einsatz. Angestrebt wird daher der Übergang von einer forschungsorientierten hin zu einer operationellen nachhaltigen Erdbeobachtung. Dadurch könnten dann homogene, konsistente und stabile Langzeitbeobachtungsreihen erzielt werden, für die GGOS einen einheitlichen Referenzrahmen bereitstellen kann.

Um dieses hochgesteckte Ziel zu erreichen, wurden verschiedene Gremien ins Leben gerufen, die sich idealerweise gegenseitig ergänzen (Plag, 2008). Bei der *Group on Earth Observations* (GEO) handelt es sich um eine Regierungsorganisation, die zukünftig wohl eine zentrale Rolle im Bereich der Erdbeobachtung einnehmen wird. GEO soll unter anderem ein *Global Earth Observation System of Systems* (GEOSS) auf den Weg bringen. Mit dessen Hilfe soll auf insgesamt neun Gebieten ein Fortschritt für die globale Gesellschaft erzielt werden: Naturkatastrophen, Gesundheit, Energie, Klima, Wasser, Wetter, Ökosysteme, Landwirtschaft und Artenvielfalt. IGOS-P (*Integrated Global Observing Strategy Partnership*) vereinigt dagegen als Nichtregierungsorganisation eine ganze Reihe der wichtigsten Anbieter und Nutzer von Erdbeobachtungen. Abgezielt werden soll vor allem auf Bereiche, in denen internationale Strukturen nicht in ausreichendem Maße vorhanden sind. So wurden bislang folgende Tätigkeitsbereiche festgelegt bzw. vorgeschlagen: Kohlenstoffkreislauf, Naturkatastrophen, Ozeane, Wasserkreislauf, Atmosphärenchemie, Küsten, Korallenriffe, Landfläche, Eismassen und Erddynamik. GGOS vertritt die IAG offiziell in diesen beiden Gremien und kann auf diesem Wege womöglich auch für eine verbesserte Wahrnehmung der Geodäsie in der Gesellschaft sorgen.

Quasi eine kleine Kopie von GGOS wird im Rahmen des Geotechnologien-Projektes GGOS-D (Global Geodetic-Geophysical Observing System – Deutschland) derzeit durch GFZ, DGFI, das Institut für Geodäsie und Geoinformation der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (GIUB) sowie das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) realisiert (Rothacher et al., 2007). Ziel des Projektes ist es, langjährige GPS-, VLBI- und SLR-Beobachtungszeitreihen mit jeweils zwei unabhängigen Softwarepaketen zu verarbeiten, um die Lösungen schließlich untereinander sowie mit Altimetrie- und LEO-Lösungen zu kombinieren. Um größtmögliche Konsistenz zu erreichen, müssen sich alle beteiligten Softwarepakete an genau vorgegebene Standards halten. Dadurch soll letztendlich der Vorteil einer sog. „rigorosen“ Kombination möglichst aller gemeinsamen Parameter aufgezeigt werden. Außerdem lassen sich mögliche Probleme abschätzen, welche die internationalen Dienste der IAG bei der Realisierung von GGOS zu bewältigen haben werden.

Im Vergleich zu den Kombinationslösungen des IERS (vgl. Kap. 4.2.1) kann GGOS-D zwar nur auf eine verhältnismäßig geringe Zahl unabhängiger Analysezentren zurückgreifen, dafür sollten jedoch die vorliegenden individuellen

Techniklösungen weitaus konsistenter sein, da alle beteiligten Softwarepakete im Hinblick auf Modellierung und Parametrisierung abgeglichen wurden. Die Hinzunahme von Altimeter- und LEO-Daten erlaubt erstmals eine konsistente Schätzung von Geometrie, Erdrotation, Schwerefeld und Meereshöhen. An zusätzlichen Parametern im Vergleich zu den Lösungen der internationalen Dienste sollen Quasarkoordinaten, Nutations- und Troposphärenparameter sowie die Koeffizienten niedrigen Grades des Erdschwerefeldes geschätzt und kombiniert werden. Außerdem wird eine deutlich höhere zeitliche Auflösung angestrebt, wovon insbesondere die ERP profitieren. Erwartet wird, daß sich durch Kombination aller Lösungen erd- und raumfeste Referenzrahmen realisieren lassen, die den momentanen Realisierungen (ITRF2005, ICRF-Ext. 2) im Hinblick auf Genauigkeit und vor allem Konsistenz überlegen sind.

4.5. Probleme mit systematischen Effekten

In den vorangegangenen Kapiteln tauchten bereits an mehreren Stellen systematische Effekte innerhalb einer Beobachtungstechnik bzw. zwischen verschiedenen Techniken auf. Rothacher (2003) hält die Behandlung der systematischen Effekte für den heikelsten Punkt, den es bei der Kombination von Normalgleichungen oder Beobachtungen verschiedener Techniken zu beachten gilt. Der Vorteil gegenüber einer Kombination von Zielparametern (vgl. Kap. 4.1) liegt darin, daß solche systematischen Effekte nicht verborgen bleiben. Um negative Einflüsse auf die Kombinationslösung zu verhindern, kommt man jedoch nicht umhin, *alle* systematischen Effekte zu untersuchen und zu verstehen. Kann ein systematischer Effekt nicht durch Modellverbesserungen o.ä. behoben werden, müssen u.U. Hilfsparameter aufgesetzt werden.

Eine ganze Reihe von systematischen Effekten ist bereits bekannt. Es ist jedoch davon auszugehen, daß bei zunehmender Optimierung der Kombinationsalgorithmen weitere Inkonsistenzen auftreten werden (Rothacher, 2003):

- Systematische Differenzen im Maßstab des globalen Stationsnetzes, wie z.B. von Altamimi et al. (2007) bei der Berechnung des ITRF2005 zwischen VLBI und SLR festgestellt (vgl. Kap. 4.2.1). Ursachen solcher Differenzen könnten z.B. eine unzulängliche Stationsverteilung, fehlerbehaftete Vektoren zwischen den Referenzpunkten, Variationen der Antennenphasenzentren, die zur Modellierung der troposphärischen Refraktion verwendeten *mapping functions* oder relativistische Effekte sein.
- Systematische Bahndifferenzen wie z.B. der radiale Versatz zwischen GNSS- und SLR-Satellitenbahnen (vgl. Kap. 4.3.3 und 5.2.6).
- Systematische Differenzen in der troposphärischen Zenitverzögerung (vgl. Kap. 4.2.2), die u.a. durch eine unzureichende Modellierung der Phasenzentrumspositionen (relative statt absoluter Phasenzentrumsvariationen, nicht modellierter Radomeinfluß, Deformationen der VLBI-Teleskope) hervorgerufen werden können.
- Systematische Differenzen in den Troposphärengradienten (vgl. Kap. 4.2.2), z.B. infolge fehlerbehafteter Vektoren zwischen den Referenzpunkten verschiedener Techniken.
- Systematische Unterschiede in den Koordinaten des Geozentrums, hervorgerufen durch die unterschiedliche Netzgeometrie der verschiedenen Techniken.
- Systematische Fehler in den mit Satellitentechniken bestimmten Änderungsraten der Nutation sowie in der Tageslänge LOD.
- Systematische Effekte in den Zeitreihen von Stationskoordinaten wie jährliche Signale oder nichtlineare Stationsbewegungen. Sprünge in den Zeitreihen durch Veränderungen an der Instrumentierung.
- SLR *range biases*, d.h. stations- und/oder satellitenabhängige Korrekturen an den SLR-Beobachtungen (Husson, 2003), sowie Nichtlinearität der *Stanford counter* (Gibbs et al., 2007)
- Systematische Einflüsse durch das Antennenverhalten: Deformationen infolge Temperatur und Schwerkraft sowie Radomeinflüsse bei VLBI (vgl. Kap. 2.2.3), Phasenzentrumsvariationen der Sende- und Empfangsantennen sowie Radomeinflüsse bei GNSS (vgl. Kap. 5) und Phasenzentrumsvariationen bei DORIS (Willis et al., 2005, 2007).

Die in obiger Auflistung an mehreren Stellen auftauchende Modellierung der GNSS-Phasenzentren, die exemplarisch für alle systematischen Effekte im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben wird, war während der letzten Jahre Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen. Auch wenn mit dem bereits vollzogenen Umstieg von relativen auf absolute Phasenzentrumskorrekturen (Schmid et al., 2007) ein bedeutender Fortschritt erzielt werden konnte, bestehen doch nach wie vor eine Reihe offener Fragen und ungelöster Probleme, die das Antennenverhalten zu einem derjenigen Faktoren machen, welche die Genauigkeit der GNSS-Auswertung entscheidend

begrenzen. Unzulänglichkeiten in der Modellierung der Phasenzentrumsposition wirken sich u.a. systematisch auf den globalen Maßstab, die Stationshöhen sowie die troposphärische Zenitverzögerung aus (vgl. hierzu auch Kap. 5.3).

Doch nicht nur GNSS weisen Probleme mit der Stabilität ihrer Phasenzentren auf. Während DORIS-Antennen vergleichbare Phänomene wie die GNSS-Antennen zeigen (Willis et al., 2005), treten bei VLBI-Teleskopen völlig anders gelagerte Effekte auf. Dadurch ist der Vergleich bzw. die Kombination von GNSS- und VLBI-Resultaten gut geeignet, um Rückschlüsse auf die Güte entsprechender Phasenzentrumsmodelle zu ziehen. Solche Vergleiche werden insbesondere in Kap. 5.3 zur Validierung des absoluten GNSS-Phasenzentrumsmodells herangezogen.

Das Phasenzentrum einer GNSS-Antenne hängt einerseits von Bauteilen im Antennennahfeld (Radom, Grundplatte, Chokering) sowie andererseits von der Richtung des abgestrahlten bzw. einfallenden Signals ab (vgl. Kap. 5). Da VLBI-Teleskope hingegen jeweils in Richtung der beobachteten Quasare ausgerichtet werden, besteht hier keine Richtungsabhängigkeit (Rothacher et al., 1995). Stattdessen werden die Teleskope durch Temperatur- sowie Schwerkrafteinflüsse deformiert (vgl. Kap. 2.2.3), wodurch sich die Position des Referenzpunktes ebenfalls verändert. Ob sich auch die Radome, von denen einige der VLBI-Teleskope geschützt werden, auf die Beobachtungen auswirken können, scheint bislang nicht thematisiert worden zu sein. An den Instrumenten zum Signalempfang zeigt sich jedenfalls die Komplementarität zwischen GNSS und VLBI besonders deutlich.

5. Modellierung des Phasenzentrums der GNSS-Antennen

5.1. Empfangsantennen

Der Markt für GNSS-Empfangsantennen ist nahezu unüberschaubar. Im Februar 2005 konnte man aus knapp 300 verschiedenen Antennen von ungefähr 40 Herstellern wählen (Whitford, 2005), wobei natürlich nicht alle Antennen geodätischen Ansprüchen genügten. Die IGS-Datei `rcvr_ant.tab`, welche die Bezeichnungen für Antennen und Empfänger definiert, die innerhalb des IGS zu verwenden sind, umfaßt immerhin noch knapp 160 verschiedene Antennen. Ein Teil dieser Antennentypen kann jedoch bereits wieder als historisch bezeichnet werden. All die verschiedenen Typen, die bei GNSS-Messungen zum Einsatz kommen, lassen sich im Prinzip auf zwei einfache Grundformen zurückführen: Drahtantennen auf der einen und *Microstrip*- bzw. *Patch*-Antennen auf der anderen Seite (Menge, 2003).

5.1.1. Aufbau

Drahtantennen

Eine Drahtantenne (*wire antenna*) kann aus einem oder mehreren Strahlerelementen oder ganzen Drahtstrukturen bestehen (Menge, 2003). Bei den im GNSS-Einsatz befindlichen Drahtantennen lassen sich nochmals zwei Gruppen unterscheiden:

- Spiral- oder Helix-Konstruktionen (vgl. Typ 1–3 in Abb. 5.1)
- Monopol- oder Dipol-Konfigurationen (vgl. Typ 4 in Abb. 5.1)

Vertreter der Helix-Antennen sind beispielsweise die TI4100-Antennen von Texas Instruments (TI4100_100, TI4100_2000, TI4100_4000; Sims, 1985) oder die TRM10877.10_H von Trimble. Prominentester Vertreter der Dipolkonstruktionen, die jeweils eine Grundplatte benötigen, ist das Dorne-Margolin Element C146. Diese Antenne, die von verschiedenen Herstellern samt zugehörigen *choke rings* (*to choke* = drosseln) angeboten wird, ist aufgrund ihres stabilen Phasenzentrums sowie ihrer guten Empfangseigenschaften die am weitesten verbreitete Referenzstationsantenne geworden. Mögliche Unterschiede zwischen Choking-Antennen verschiedener Hersteller wurden z.B. von Schupler und Clark (2000) untersucht.

Microstrip- oder Patch-Antennen

Sog. *Microstrip*- oder *Patch*-Antennen, die auch als planare Leiterbahnstrukturen bezeichnet werden, bestehen aus drei Schichten (vgl. Typ 5 in Abb. 5.1): zwischen einer metallischen Grundplatte und einer sehr dünnen metallischen Leiterbahn (*Patch*-Strahler oder *Microstrip*) befindet sich ein Substrat (Dielektrikum), in dem eine Welle geleitet und übertragen werden kann. Die meisten der zur Zeit eingesetzten GNSS-Antennen gehören zu dieser Gruppe (Langley, 1998; Menge, 2003).

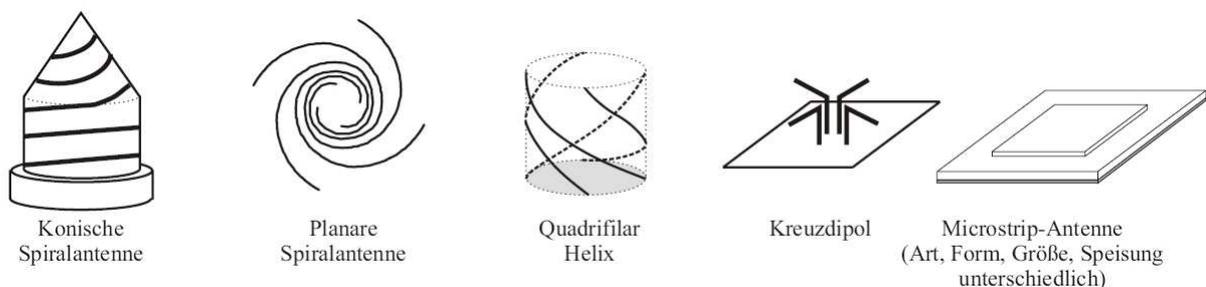


Abb. 5.1.: Grundformen der für GNSS-Messungen genutzten Antennentypen (Menge, 2003).

5.1.2. Modellierung des Phasenzentrums

Im Prinzip muß die exakte Position des Phasenzentrums der Empfangsantenne bekannt sein, da dieses den Endpunkt der zu den jeweiligen Satelliten gemessenen Strecken repräsentiert. Eine ideale Antenne würde über einen punktförmigen Empfang verfügen, womit eine konstante Beziehung zwischen dem Phasenzentrum und der physikalischen Antenne bestünde. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Antennen läßt sich dies jedoch nicht realisieren. Das Phasenzentrum als der Ort des elektrischen Bezugspunktes der Antenne variiert je nach Antennentyp mehr oder weniger stark mit der Einfallsrichtung des empfangenen Signals. Approximiert man eine ankommende Phasenfront durch eine Kugeloberfläche, so kann der entsprechende Kugelmittelpunkt zumindest als mittleres Phasenzentrum festgelegt werden. Bei den verbleibenden Phasenzentrumsvariationen (PCVs) beschränkt man sich vereinfachend auf deren Wirkung anstatt auf deren Ursache. Man geht davon aus, daß eine Verschiebung des Phasenzentrums eine Verfälschung der gemessenen Distanz zum Satelliten bewirkt, die durch geeignete Kalibrierungsmessungen für jede Einfallsrichtung bestimmt werden kann (Geiger, 1988).

Zur Beschreibung der Position des Phasenzentrums geht man vom sog. Antennenreferenzpunkt (*antenna reference point*) ARP aus, der den physikalischen Bezugspunkt der Antenne darstellt, und bis zu dem die Antennenhöhe über einem entsprechenden Bodenpunkt zu messen ist. Die genaue Festlegung des ARP für die wichtigsten geodätischen Antennen kann man in der IGS-Datei `antenna.gra` finden. Außerdem sollte für jede Antenne festgelegt sein, wie sie horizontal auszurichten ist. Verfügt die Antenne nicht über einen entsprechenden Nordpfeil, können Kabelanschlüsse o.ä. die Nordrichtung definieren. An diesem Punkt gibt es jedoch momentan bei einigen Antennentypen noch ein Defizit, was eine international verbindliche Konvention angeht.

Die weiteren Größen zur Beschreibung des Phasenzentrums werden in einem topozentrischen System (Linkssystem) festgelegt, das seinen Ursprung im ARP hat. Dabei zeigt die x -Achse nach Norden, die y -Achse nach Osten und die z -Achse zum Zenit. Die Richtung zum Satelliten läßt sich in diesem System durch das Azimut α (von Norden positiv im Uhrzeigersinn gezählt) und den Zenitwinkel z beschreiben. Bei einer nach Norden ausgerichteten Antenne, beschreibt der sog. Phasenzentrumsoffset (PCO) $\mathbf{X} = (x, y, z)'$ die Position des mittleren Phasenzentrums PC gegenüber dem ARP. Die richtungsabhängigen PCVs $\phi(z, \alpha)$ werden in Abhängigkeit des Zenitwinkels und des Azimuts angegeben. PCO und PCVs, die sich je nach Frequenz unterscheiden, müssen immer konsistent verwendet werden und sind im IGS nach folgender Vorzeichen-Konvention anzubringen (Rothacher und Mader, 1996; Rothacher und Schmid, 2006), wobei ρ für die Entfernung zwischen Empfänger und Satellit steht:

$$\text{PC} = \text{ARP} + \text{PCO} \quad (5.1)$$

$$\rho_{\text{beobachtet}} = \rho_{\text{modelliert}} + \text{PCV} + \text{weitere Korrekturen} \quad (5.2)$$

Die Aufteilung in PCO und PCVs ist im Prinzip völlig beliebig, in der Regel wird jedoch versucht, den PCO so zu wählen, daß entweder der Maximalwert der PCVs oder die PCVs im Mittel minimiert werden. In jedem Fall ist es aber natürlich möglich, zwischen verschiedenen Beschreibungen des Antennenphasenzentrums zu transformieren. Dies ist insbesondere dann von großer Bedeutung, wenn man verschiedene Parametersätze vergleichen möchte. Im letzten Fall bietet es sich an, alle Sätze auf einen einheitlichen PCO umzurechnen, um dann die PCVs vergleichen zu können. Ausgehend von einem PCO $\mathbf{X}_0 = (x_0, y_0, z_0)'$ samt konsistenten PCVs $\phi_0(z, \alpha)$ erhält man durch eine Offsetänderung $\Delta\mathbf{X} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)'$ folgende völlig gleichwertige Darstellung (Rothacher et al., 1995):

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \Delta\mathbf{X} \quad (5.3)$$

$$\phi(z, \alpha) = \phi_0(z, \alpha) - \Delta\mathbf{X} \cdot \mathbf{e} + \Delta\phi_0 \quad (5.4)$$

Dabei beschreibt \mathbf{e} den Einheitsvektor vom Empfänger zum Satelliten:

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} \sin z \cdot \cos \alpha \\ \sin z \cdot \sin \alpha \\ \cos z \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

Darüber hinaus bezeichnet $\Delta\phi_0$ eine beliebige Additionskonstante, die üblicherweise so gewählt wird, daß $\sum \phi(z, \alpha) = 0$. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, $\Delta\phi_0$ so zu wählen, daß der PCV-Wert $\phi(z = 0^\circ, \alpha)$ in Zenitrichtung Null wird. Eine Additionskonstante $\Delta\phi_0$ ist zulässig, da ein für alle Richtungen konstanter Versatz nicht von der Empfängeruhr getrennt werden kann. Ist man nur am Einfluß einer Änderung Δz des Höhenoffsets auf die elevationsabhängigen PCVs interessiert, so vereinfacht sich (5.4) zu

$$\Delta\phi(z, \alpha_0) = \phi(z, \alpha_0) - \phi_0(z, \alpha_0) = -\Delta z \cdot \cos z + \Delta\phi_0 \quad (5.6)$$

Da die Phasenzentrumskorrekturen von der Frequenz abhängig sind, müssen sie beim Bilden von Linearkombinationen L_x (aus den Phasenmessungen auf den Trägerwellen L_1 und L_2) entsprechend umgerechnet werden:

$$\mathbf{X}_x = \kappa_{1,x} \mathbf{X}_1 + \kappa_{2,x} \mathbf{X}_2 \quad (5.7)$$

$$\phi_x(z, \alpha) = \kappa_{1,x} \phi_1(z, \alpha) + \kappa_{2,x} \phi_2(z, \alpha) \quad (5.8)$$

Dabei bezeichnen die Indizes „1“ bzw. „2“ die für die Frequenzen f_1 bzw. f_2 gültigen Phasenzentrumskorrekturen. In Abhängigkeit der Faktoren κ kann es bei der Bildung von Linearkombinationen zu einer Verstärkung des Phasenzentrumseffekts kommen. Dies ist insbesondere beim Bilden der ionosphärenfreien Linearkombination L_c mit $\kappa_{1,c} = f_1^2/(f_1^2 - f_2^2)$ bzw. $\kappa_{2,c} = -f_2^2/(f_1^2 - f_2^2)$ der Fall.

Für die Modellierung der PCVs $\phi(z, \alpha)$ im Rahmen einer Schätzung aus Beobachtungsdaten gibt es drei verschiedene Ansätze:

- Polygone: bei gleichzeitiger Schätzung in Elevations- und Azimutrichtung ergibt sich ein Gitter von Stützstellen, die durch stetige, stückweise lineare Funktionen miteinander verbunden sind (Rothacher et al., 1995)
- Polynome: Grad n festzulegen (Mader, 1999); wohl nur bei rein elevationsabhängigen PCVs praktikabel
- Kugelflächenfunktionen: Grad n und Ordnung m festzulegen (Menge et al., 1998):

$$\phi(z, \alpha) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\cos z) \cdot (a_{nm} \cos m\alpha + b_{nm} \sin m\alpha) \quad (5.9)$$

\tilde{P}_{nm} sind dabei die normalisierten zugeordneten Legendrepolynome, a_{nm} und b_{nm} entsprechende Kugelfunktionskoeffizienten. Dieser Ansatz beschränkt die Anzahl der Unbekannten auf ein sinnvolles Maß, v.a. bei Schätzung in Azimutrichtung.

Unabhängig davon, nach welchem Modell die PCVs ermittelt wurden, erfolgt der Austausch von Kalibrierungsergebnissen fast ausschließlich in tabellarischer Form. Dabei sind in Elevationsrichtung eine Auflösung von 5° und in Azimutrichtung eine Auflösung von 5° bzw. 10° üblich. Um schließlich Korrekturwerte für eine bestimmte Beobachtungsrichtung zu erhalten, wird in der Regel linear zwischen den tabellierten Werten interpoliert.

5.1.3. Kalibrierungsmethoden

Eine schöne Übersicht über die verschiedenen Verfahren zur Bestimmung von PCO und PCVs gibt Mayer (2002). Prinzipiell unterscheidet man zwischen absoluten und relativen Verfahren, wobei sich die Korrekturen im zweiten Fall auf eine Referenzantenne beziehen, sowie zwischen Feld- und Kammerkalibrierungen. Während in mikrowellenlosen Räumen mit künstlichen Signalen gearbeitet werden muß, können bei Feldkalibrierungen reale GNSS-Signale genutzt werden. Tab. 5.1 gibt einen Überblick über die Art der Korrekturwerte, die sich aus den verschiedenen Kalibrierverfahren ergeben.

Tab. 5.1.: Verschiedene Methoden zur Kalibrierung von GNSS-Antennen und deren Resultate (Görres et al., 2006).

Kalibrierungsmethode	PCO horizontal	PCO vertikal	PCVs
Feldkalibrierung (ohne Drehen der Antenne)	relativ	relativ	relativ
Feldkalibrierung (mit Drehen der Antenne)	absolut	relativ	relativ
Roboterkalibrierung	absolut	absolut	absolut
Kammerkalibrierung	absolut	absolut	absolut

Im IGS wurden ab dem 30. Juni 1996 relative Phasenzentrumskorrekturen eingesetzt, da mit absoluten Werten eine Maßstabsdifferenz von 15 ppb gegenüber VLBI und SLR in globalen GPS-Lösungen auftrat (Beutler, 1996). Erst Schmid und Rothacher (2003) konnten nachweisen, daß sich bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Phasenzentrumskorrekturen für die Satellitenantennen das Problem mit dem Maßstab umgehen läßt. Fixiert man den

globalen „VLBI-Maßstab“ und führt absolute Korrekturen für die Empfangsantennen ein, so lassen sich konsistente Korrekturen für die Sendeantennen bestimmen (vgl. Kap. 5.2.4). Seit 5. November 2006 werden nun absolute Korrekturwerte bei der Generierung der verschiedenen IGS-Produkte verwendet (Gendt, 2006). Offizielles Format für den Austausch von Antennenkorrekturwerten ist seither das sog. ANTEX-Format¹ (*antenna exchange format*; Rothacher und Schmid, 2006; Rothacher und Mader, 2003).

Relative Feldkalibrierung

Die relative Feldkalibrierung ist das am einfachsten zu realisierende und deswegen wohl auch wirtschaftlichste und am weitesten verbreitete Verfahren zur Kalibrierung des Phasenzentrums von GNSS-Antennen. Hierbei wird auf einer kurzen Basislinie bekannter Länge eine statische Messung mit der zu kalibrierenden sowie der Referenzantenne durchgeführt. Als Referenzantenne kommt hierbei mittlerweile wohl ausschließlich die AOAD/M_T von *Allen Osborne Associates* (vgl. Antennenelement C146 in Kap. 5.1.1) zum Einsatz. Unter der Annahme, daß wegen des geringen Punktabstandes alle Fehlerquellen verschwindend klein sind, hinreichend gut modelliert werden können oder aufgrund langer Beobachtungszeiten nicht vorliegen, können alle Abweichungen vom Soll-Basislinienvektor dem Phasenzentrum der zu kalibrierenden Antenne zugeschrieben werden (Breuer et al., 1995; Rothacher et al., 1995).

Der größte Nachteil der relativen Kalibrierung besteht darin, daß man das Phasenzentrumsverhalten der Referenzantenne eigentlich kennen müßte. Liegen für die Referenzantenne Resultate einer Absolutkalibrierung vor, so kann man selbst mit einer *relativen* Feldkalibrierung die *absolute* Position des Phasenzentrums der zu prüfenden Antenne ermitteln (vgl. Tab. 5.1). Zu Beginn der 1990er Jahre, als man sich des Problems richtungsabhängiger Phasenzentrumskorrekturen bewußt wurde, hatte man solche Werte jedoch noch nicht zur Verfügung. Deswegen mußte die Lage des Phasenzentrums der AOAD/M_T per Konvention festgelegt werden. Man entschied innerhalb des IGS, die PCO-Werte vom Hersteller zu übernehmen ($z_I = 11.0$ cm, $z_{II} = 12.8$ cm) und die PCVs zu Null zu setzen (Mader und MacKay, 1996). Es war jedoch von Anfang an klar, daß diese Festlegung nicht der Realität entsprechen würde (Mader, 1999). Probleme treten dann auf, wenn ein und derselbe Satellit von den beiden Antennen an den Endpunkten einer Basislinie unter verschiedenen Elevationen beobachtet wird. Dies ist insbesondere bei sehr langen Basislinien der Fall, daneben aber auch, wenn eine der Antennen aus irgendeinem Grund gegenüber der Horizontalen geneigt sein sollte.

Als Vorteil der relativen Feldkalibrierung wird angesehen, daß die Antennen in einer „natürlichen“ Umgebung, mit echten GNSS-Signalen und in Gebrauchslage kalibriert werden. Genau hier liegen aber auch einige weitere Nachteile des Verfahrens begründet. Die „natürliche“ Umgebung bringt zwangsläufig Multipath-Einflüsse mit sich, die sich auch durch Differenzbildung nicht eliminieren lassen. Durch eine geeignete Wahl des Standortes für die Kalibrierungseinrichtung (flaches Gelände, freier Horizont, wenige reflektierende Flächen) lassen sich Mehrwege-Einflüsse aber zumindest minimieren. Die ausschließliche Kalibrierung in Gebrauchslage bringt zudem eine ungleichmäßige Beobachtungsverteilung mit sich, die sich zum einen in einer abnehmenden Genauigkeit zum Zenit hin zeigt und zum anderen für Probleme in Horizontnähe sorgt (s. Kap. 5.1.4). Während in Zenitrichtung ausschließlich die geringe Anzahl von Beobachtungen ein Problem darstellt, kommen bei niedriger Elevation noch verstärkt Mehrwege-Einflüsse und die atmosphärische Refraktion hinzu. In aller Regel werden deswegen keine PCV-Werte für den Bereich unterhalb von 10° Elevation veröffentlicht.

Um eine bessere Verteilung der Beobachtungen zu erzielen, besteht die Möglichkeit, die zu kalibrierende Antenne definiert zu drehen. Damit umgeht man insbesondere Probleme mit dem sog. Nordloch, das in bestimmten Breiten auftritt, wo keine Satelliten in nördlicher Richtung beobachtet werden können (Rothacher et al., 1995). Das Drehen des Prüflings bringt auch den Vorteil, daß absolute horizontale PCOs und azimutale PCVs bestimmbar werden. Letztere werden in aller Regel jedoch vernachlässigt. Die TU Dresden arbeitet nach wie vor an automatischen Dreheinrichtungen, um das relative Feldkalibrierungsverfahren noch zu beschleunigen (Frevert et al., 2003).

Die größte Verbreitung haben die Korrekturwerte des *National Geodetic Survey* (NGS) erlangt. Diese sind unter <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/> auch frei verfügbar. Sämtliche Resultate stammen von einer ca. 5 m langen Basislinie in Corbin, Virginia, die immer mit derselben Referenzantenne besetzt wird. Um Fehlereinflüsse durch die Empfängeruhr zu verhindern, sind beide Empfänger mit einem externen Frequenznormal verbunden (Mader, 1999). Auch wenn sich im IGS mittlerweile absolute Roboterkalibrierungen durchgesetzt haben, werden für alle Antennen, für die keine solchen Werte vorliegen, nach wie vor NGS-Kalibrierungen verwendet.

¹<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex13.txt>

Absolute Roboterkalibrierung

Um die Hauptnachteile der *relativen* Feldkalibrierung (Abhängigkeit von einer Referenzantenne, Multipath-Einfluß, schlechte Beobachtungsverteilung) zu umgehen, wurde ab Mitte der 1990er Jahre vom Institut für Erdmessung der Universität Hannover in Zusammenarbeit mit der Firma Geo++ GmbH ein Roboter zur *absoluten* Kalibrierung von GNSS-Antennen im Felde entwickelt (Wübbena et al., 1997). Der Begriff „absolut“ steht hierbei für die Unabhängigkeit der Phasenzentrumskorrekturen von einer Referenzantenne, nicht jedoch für absolute Korrekturwerte im eigentlichen Sinne. Da das *Niveau* der PCVs auch mit dem Roboter nicht von der Empfängeruhr zu trennen ist (vgl. Gleichung (5.4)), beschränken sich die absoluten Werte auf die Beschreibung der *Topographie* der PCVs (Menge, 2003).

Interessant zu erwähnen ist auch, daß bei der Roboterkalibrierung — genau wie bei der relativen Feldkalibrierung — die Messungen auf einer kurzen Basislinie ausgewertet werden, obwohl es sich um ein absolutes Verfahren handelt. Die Unabhängigkeit von den PCVs der „Referenzantenne“ wird dadurch erlangt, daß die zu kalibrierende Antenne gedreht und gekippt wird, während die „Referenzantenne“ ihre Ausrichtung beibehält. Bildet man nun sog. Doppeldifferenzen (*double differences*), so werden die PCVs der „Referenzantenne“ eliminiert, während für den Prüfling PCV-Differenzen gegenüber einer Nullstellung des Roboters übrigbleiben. Durch die Möglichkeit, die zu kalibrierende Antenne nahezu beliebig auszurichten, kann auch für eine homogene Verteilung der Beobachtungen gesorgt werden. Während bei der relativen Feldkalibrierung eine Veränderung der Satellitenkonstellation abgewartet werden muß, um eine ausreichende Überdeckung der Antennenhemisphäre mit Beobachtungen zu erhalten, wird die Antenne bei der Roboterkalibrierung aktiv mit durchschnittlich 6000–8000 Einzelbeobachtungen abgetastet (Menge, 2003). Das Kippen der Antenne ermöglicht schließlich auch eine verlässliche Bestimmung der PCVs bis zu einer Elevation von 0°. Da man jede Roboterposition im Prinzip mit Submillimetergenauigkeit kennen muß, ist vorab eine genaue Kalibrierung des Roboters mit einem Tachymetermesssystem erforderlich.

Zur Beseitigung der Multipath-Einflüsse wurde ursprünglich ausgenutzt, daß sich nach einem sog. siderischen Tag (ca. 23 h 56 min) die Satellitenkonstellation und damit auch die Geometrie zwischen Satellit, Multipath-verursachendem Reflektor und Empfangsantenne wiederholt. Hatte man Daten einer Kalibrierungsmessung von zwei aufeinanderfolgenden Tagen, so konnte durch das Bilden einer siderischen Tagesdifferenz der Multipath-Einfluß nahezu vollständig eliminiert werden (Wübbena et al., 1997; Menge und Seeber, 2000). Probleme gab es nur dann, wenn sich z.B. aufgrund von Nässe die Reflexionseigenschaften an den beiden Tagen unterschieden (Böder, 2002). Beim aktuellen Robotermodell wird jedoch ein anderer Ansatz verfolgt. Hier kann die Antenne so schnell von einer Position in die nächste gefahren werden, daß man während dieser Zeit von einem konstanten Multipath-Einfluß ausgehen kann. Dadurch wird es möglich, diesen durch Bilden von Differenzen zwischen aufeinanderfolgenden Epochen (*triple differences*) zu eliminieren (Wübbena et al., 2000; Schmitz et al., 2002).

In der Zwischenzeit werden bereits von drei verschiedenen Institutionen Roboter zur Kalibrierung von GNSS-Antennen betrieben. Neben den beiden Institutionen, die an der Entwicklung beteiligt waren, bietet seit Mai 2006 auch die Landeskalibriereinrichtung der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung in Berlin entsprechende Dienste an (Wübbena et al., 2008). Die Firma Geo++ GmbH sammelt ihre Resultate in einer Datenbank, die im Frühjahr 2008 Werte für mehr als 1100 Einzelexemplare von knapp 150 verschiedenen Antennentypen enthielt. Die vergleichsweise große Nachfrage nach Antennenkalibrierungen ist beispielsweise im Beschluß 110/5 der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) begründet, wonach seit April 2002 alle Antennen, die auf SAPOS-Referenzstationen zum Einsatz kommen, individuell kalibriert werden müssen. Mittelwerte für die einzelnen Antennentypen sind gegen Gebühr unter <http://gnpcvdb.geopp.de/> verfügbar. Mit dem Umstieg des IGS auf das absolute Antennenkorrekturmodell im November 2006 sind die Roboterkalibrierungen auch international zu einer Art Standard geworden (Gendt, 2006). Der IGS stützt sich im Moment jedoch noch auf Typmittelwerte, was den Ansprüchen des IGS sicher noch nicht vollends gerecht wird.

Absolute Kammerkalibrierung

Da bereits Mitte der 1980er Jahre erste GPS-Antennen in mikrowellentoten Räumen untersucht wurden (Sims, 1985; Schupler und Clark, 1991), stellt die absolute Kammerkalibrierung das älteste Verfahren zur Kalibrierung von GNSS-Antennen dar. Infolge mangelnder Operationalität konnte dieses relativ aufwendige Verfahren jedoch nie mit der schnell wachsenden Anzahl verschiedener Antennen Schritt halten. Deswegen sind Antennenkorrekturwerte aus Kammermessungen in der Praxis bislang wohl überwiegend zu Testzwecken zum Einsatz gekommen. In jüngster Vergangenheit konnten Kammermessungen durch übereinstimmende Resultate jedoch zumindest einen Beitrag zur Akzeptanz der Roboterkalibrierungen liefern, deren Qualität zunächst von verschiedenen Seiten angezweifelt worden war (Campbell et al., 2004; Görres et al., 2006, vgl. Kap. 5.1.4). Vorteil der Kammerkalibrierung ist in jedem Fall die vollkommene Unabhängigkeit von einer Referenzantenne.

Bei Kammermessungen muß zwangsläufig ein künstlicher GNSS-Sender zum Einsatz kommen, der ein idealisiertes fehlerfreies GNSS-Signal aussendet. Um Reflexionen an den Wänden zu vermeiden und dadurch Multipath-Einflüsse zu minimieren, sind die sog. mikrowellentoten Räume oder Absorberhallen an den Wänden mit Materialien verkleidet, die Mikrowellen absorbieren sollen. Da es in der Regel praktischer ist, Sende- und Empfangsantenne horizontal anzuordnen, muß die zu kalibrierende Antenne um 90° gegenüber der üblichen Gebrauchslage gekippt werden. Während man den künstlichen Sender festhält, wird der Prüfling um mindestens zwei Achsen schrittweise gedreht, um so die gesamte Antennenhemisphäre mit Meßwerten abzutasten. Größte Schwierigkeit ist dabei, den Rotationspunkt in Bezug auf den ARP mit Submillimetergenauigkeit zu kennen.

Der hohe Zeit- und Kostenaufwand für die Kammerkalibrierung war bislang auch in mangelnder Automatisierung begründet. Das Geodätische Institut der Universität Bonn versucht deswegen in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Darmstadt ein Labor-Eichsystem zur automatisierten Kammereichung mit Hilfe eines Netzwerkanalysators und automatisierter Datenerfassung zu entwickeln (Zeimetz und Kuhlmann, 2006). Begrenzender Faktor ist jedoch auch hier der nur sehr eingeschränkt mögliche Zugang zur Absorberhalle der Bundeswehr in Greding. Deswegen wird untersucht, ob an Alternativ-Standorten vergleichbare Resultate erzielt werden können (B. Görres, pers. Mitteilung).

Stationskalibrierung des JPL

Zum Abschluß sei noch die Stationskalibrierung (*in-situ calibration*) des *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) erwähnt, die sich nicht in die obigen drei Kategorien einordnen läßt. Laut Hurst und Bar-Sever (1998) werden hierbei die Daten einer einzelnen Beobachtungsstation nach dem Verfahren des *precise point positioning* (PPP; Zumberge et al., 1997) ausgewertet, wobei globale Parameter wie Satellitenbahnen und -uhren festgehalten werden. Da demnach einzelne Antennen isoliert vom restlichen Stationsnetz betrachtet werden, kann es sich also keinesfalls um ein *relatives* Verfahren im herkömmlichen Sinne handeln. Dies zeigt sich insbesondere darin, daß auch für diejenigen Stationen Korrekturwerte ermittelt werden können, die mit der IGS-Referenzantenne AOAD/M_T ausgerüstet sind.

Andererseits sollte man aber auch nicht von *absoluten* Korrekturen für die entsprechenden *Antennen* sprechen, da durch die Stationskalibrierung auch Mehrwegeeffekte erfaßt werden. Die Berücksichtigung von systematischen Multipath-Effekten ist zwar einerseits von großem Vorteil, verhindert jedoch die Verwendung der Korrekturwerte auf anderen Stationen mit typgleichen Antennen. Dies bedeutet, daß im Prinzip jede GNSS-Beobachtungsstation individuell kalibriert werden müßte, was für Permanentstationen noch denkbar erschiene, für Antennen im mobilen Einsatz oder für kinematische Anwendungen dagegen unmöglich ist. Allenfalls könnten die gewonnenen Korrekturwerte also als absolut für die entsprechende *Beobachtungsstation* bezeichnet werden.

Neben der im Zusammenhang mit der Roboterkalibrierung bereits beschriebenen Korrelation mit der Empfängeruhr, die nicht aufgelöst werden kann, besteht im Falle der Stationskalibrierung jedoch zusätzlich noch eine Korrelation mit der Stationshöhe. Letztere wird von Phasenzentrumsvariationen (und Multipath) beeinflusst und kann ohne deren Kenntnis nicht zweifelsfrei bestimmt werden. Da andererseits jedoch die Stationshöhe vorab bekannt sein müßte, um Phasenzentrumskorrekturen in einem absoluten Sinne bestimmen zu können, befindet man sich in einem Dilemma, aus dem man sich nicht befreien kann. Auch die Fixierung der Satellitenbahnen und -uhren verursacht Abhängigkeiten von einer entsprechenden globalen Lösung, was einer absoluten Kalibrierung zuwiderläuft.

Ob Koordinaten bei der eigentlichen Stationskalibrierung mitbestimmt werden oder nicht, lassen Hurst und Bar-Sever (1998) leider offen. Grundlage für die Bestimmung von Phasenzentrumskorrekturen sind die Residuen einer Phasenauswertung nach dem PPP-Verfahren, bei der auch Troposphärenparameter geschätzt werden. Diese Residuen werden entsprechend der Beobachtungsrichtung zum jeweiligen Satelliten in Sektoren der Antennenhemisphäre eingeteilt, die eine Auflösung von 2° in Elevations- und 5° in Azimutrichtung aufweisen. Um saisonale Multipath-Effekte eliminieren zu können, werden je Station die Residuen von etwa 100 übers Jahr verteilten Tagen berücksichtigt. Dasselbe Verfahren wurde vom JPL später zur Bestimmung von Phasenzentrumskorrekturen für die GPS-Satellitenantennen eingesetzt (vgl. Kap. 5.2.5).

5.1.4. Vergleiche, Qualität

Möchte man Korrekturwerte der verschiedenen Kalibrierverfahren für identische Antennen miteinander vergleichen, so darf man den PCO und die PCVs keinesfalls isoliert voneinander betrachten. Der beste Weg ist der, zunächst die PCO-Werte zu vereinheitlichen, um dann den Unterschied zwischen verschiedenen Kalibrierungen in vollem Umfang anhand der PCV-Kurven sichtbar zu machen. Hierzu kann man Gebrauch von den Gleichungen (5.3) und (5.4) machen. Daneben empfiehlt es sich, vor dem Vergleich einen Mittelwert von den resultierenden PCV-Kurven abzuziehen (bzw. den PCV-Wert im Zenit zu Null zu setzen).

Relative Phasenzentrumskorrekturen können natürlich direkt mit anderen relativen Werten verglichen werden, genauso wie absolute Korrekturen untereinander verglichen werden können. Unter der Voraussetzung, daß man sowohl absolute als auch relative Werte für die Referenzantenne AOAD/M_T kennt, ist es aber auch möglich, relative Korrekturen mit absoluten zu vergleichen. Addiert man die Differenz zwischen absoluten und relativen Werten der Referenzantenne zu beliebigen relativen Werten, und zwar für den PCO und die PCVs getrennt, so erhält man die entsprechenden absoluten Korrekturwerte (Menge, 2003):

$$\mathbf{X}_{\text{abs}} = \mathbf{X}_{\text{rel}} + (\mathbf{X}_{\text{abs}}(\text{AOAD/M_T}) - \mathbf{X}_{\text{rel}}(\text{AOAD/M_T})) \quad (5.10)$$

$$\phi_{\text{abs}} = \phi_{\text{rel}} + \phi_{\text{abs}}(\text{AOAD/M_T}) \quad (5.11)$$

In Gleichung (5.11) fehlen die relativen PCVs $\phi_{\text{rel}}(\text{AOAD/M_T})$ der Referenzantenne, da diese per Konvention Null sind. Eine Umrechnung von absoluten in relative Werte ist analog möglich.

Aufgrund des zu Beginn von Kap. 5.1.3 erwähnten Maßstabsproblems wurden die absoluten Kammerkalibrierungen von Beginn an in Zweifel gezogen. Erst als mit der Roboterkalibrierung ein völlig unabhängiges absolutes Meßverfahren nahezu übereinstimmende Resultate lieferte, wurde der Fehler bei den Satellitenantennen gesucht (Rothacher, 2001). Auch Vergleiche zwischen absoluten und relativen Werten zeigten, daß im Prinzip alle Kalibrierverfahren trotz unterschiedlichster Konzepte denselben Effekt messen. Anhand der Vergleiche wurden auch Unzulänglichkeiten einzelner Ansätze sichtbar, wie z.B. die relativ großen Abweichungen der NGS-Werte in der Nähe des Zenits infolge einer Parametrisierung der PCVs als Polynom niedrigen Grades (Rothacher und Schmid, 2002).

Bei all diesen Vergleichen wurden zwar Kalibrierwerte für Antennen desselben Typs miteinander verglichen, selten jedoch für identische Antennen. Da sich die Position des Phasenzentrums jedoch auch innerhalb einer Baureihe leicht unterscheiden kann, waren bei den Vergleichen die Unterschiede zwischen den Kalibrierverfahren nicht von den möglichen Abweichungen der individuellen Antennen gegenüber dem Typmittel zu trennen. Um endgültige Klarheit über die Qualität und Konsistenz der verschiedenen Kalibrierverfahren zu erhalten, wurde in den Jahren 2001 und 2002 unter Führung der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) ein umfangreicher Vergleichstest durchgeführt, bei dem ein fester Antennensatz insgesamt fünf unterschiedliche Kalibriereinrichtungen durchlaufen mußte (Feldmann-Westendorff und Sorge, 2002). Unter diesen waren zwei, die über einen Roboter verfügten (Institut für Erdmessung der Universität Hannover, Geo++ GmbH), sowie drei, die relative Feldkalibrierungen durchführten (LGN, Geodätisches Institut der TU Dresden, Geodätisches Institut der Universität Bonn). Kammerkalibrierungen waren also nicht miteinbezogen. Unter den fünf verschiedenen Antennen waren drei Referenzstationsantennen und zwei Roverantennen. Anhand des Vergleichs der einzelnen Resultate (vgl. Abb. 5.2) wurde folgendes deutlich (Schmid et al., 2005a):

- Nur die Roboterkalibrierungen liefern Werte bis zum Horizont. (Für die Relativkalibrierungen wurden im Vergleichstest zu Testzwecken Werte bis zu einer Elevation von 5° angegeben, während sonst 10° üblich sind.)
- Rein elevationsabhängige PCVs unterscheiden sich schlechtestenfalls um bis zu 2 mm (L1) bzw. 4 mm (L2).
- Roboterkalibrierungen (durchgezogene Linien in Abb. 5.2) unterscheiden sich um höchstens 1 mm.
- Die größten Probleme der relativen Feldkalibrierung zeigen sich in Zenit- (wenige Beobachtungen) bzw. Horizontnähe (u.a. starker Multipath- und Atmosphäreneinfluß).
- Aus relativen Feldkalibrierungen abgeleitete absolute PCVs sind etwa um den Faktor 2 schlechter als solche aus Roboterkalibrierungen. Dies liegt zum einen an systematischen Multipath-Einflüssen, zum anderen am Fehler der Referenzantennen-Kalibrierung.
- Die Kalibrierungsergebnisse der qualitativ hochwertigeren Referenzstationsantennen stimmen besser überein als die der Roverantennen.
- Vergleiche zwischen elevations- und azimutabhängigen PCVs fallen erwartungsgemäß etwas schlechter aus als solche zwischen rein elevationsabhängigen. Die relativen Feldkalibrierungen zeigen im Vergleich zum Mittel zudem ein typisches vierfaches Muster, das von vier unterschiedlichen Antennenorientierungen herrührt (vgl. Abb. 5.3; Schmid und Rothacher, 2002).

Um die letzte verbliebene Lücke möglicher Vergleiche zu schließen, kalibrierte die Universität Bonn in Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt eine Antenne des Typs LEIAT303 (samt LEIC-Radom) in der Absorberhalle der Bundeswehr in Greding. Exakt dieselbe Antenne war zuvor vom Roboter der Firma Geo++ GmbH kalibriert worden, womit also erstmals Roboter- und Kammerwerte für ein und dieselbe Antenne vorlagen. Aufgrund der

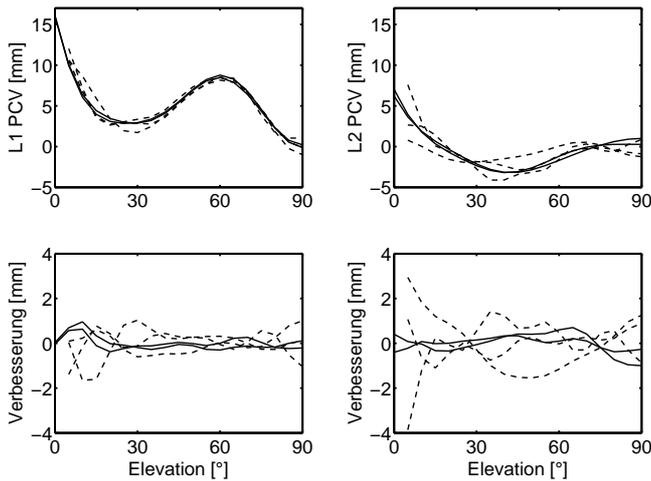


Abb. 5.2.: Vergleich der Korrekturwerte für die Antenne TRM33429.20+GP aus Roboter- (durchgezogen) bzw. relativen Feldkalibrierungen (strichliert) und deren Verbesserungen gegenüber einem ausgleichenden Mittel (Schmid und Rothacher, 2002).

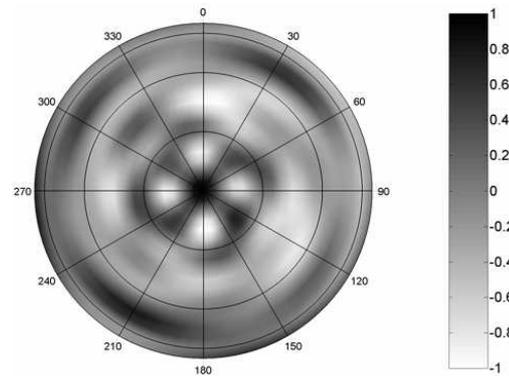


Abb. 5.3.: Verbesserungen [mm] der azimuthalen L1 PCVs der TU Dresden gegenüber einem ausgleichenden Mittel für die TRM33429.20+GP (Schmid und Rothacher, 2002).

mangelnden Automatisierung konnte die Antenne in der Absorberhalle jedoch nicht vollständig abgetastet werden. Die Kammerkalibrierung beschränkte sich auf einen „Meridian“ (Elevation von 0° bis 180° für ein bestimmtes Azimut) sowie einen „Breitenkreis“ (Azimut von 0° bis 360° bei einer Elevation von 12.5°) der Antennenhemisphäre. Die elevationsabhängigen PCVs stimmten bis auf etwa 1 mm überein. Differenzen ähnlicher Größenordnung zeigten auch die azimuthalen PCVs, obwohl die Lage des Phasenzentrums in azimuthaler Richtung sehr viel weniger variiert. Erkennbar war hier auch eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Kalibrierungen, was auf eine unzureichende azimuthale Orientierung der Antenne in der Kammer hindeuten könnte. Hervorzuheben ist noch, daß die *rohen* Kammerresultate einen ähnlich glatten Verlauf zeigten wie die Kugelflächenfunktionen, die sich aus der Roboterkalibrierung ergeben (Görres et al., 2006).

Die anhand aller angeführten Vergleiche für die absolute Roboterkalibrierung zu erwartende Genauigkeit von etwa 1 mm für L1 (L2 u.U. etwas schlechter) deckt sich sehr gut mit den Angaben von Menge (2003). Anhand von Wiederholungsmessungen konnte für den Elevationsbereich oberhalb von 10° eine Genauigkeit von ca. 0.5 mm ermittelt werden, während in Horizontnähe durchaus Differenzen von ± 1 mm oder mehr auftreten können. Die absolute Kammerkalibrierung scheint ein vergleichbares Genauigkeitspotential aufzuweisen. Zeimetz und Kuhlmann (2006) geben eine Genauigkeit von besser als 1 mm oberhalb von 10° Elevation und besser als 2 mm unterhalb an. Absolute PCVs, die aus relativen Feldkalibrierungen abgeleitet wurden, sind, wie bereits erwähnt, um etwa einen Faktor 2 schlechter.

Wie in Kap. 5.1.3 bereits erwähnt, werden innerhalb des IGS seit der Umstellung auf absolute Antennenkorrekturen im November 2006 standardmäßig absolute Roboterkalibrierungen verwendet. Da solche jedoch längst nicht für alle Antennentypen vollständig vorhanden sind, werden sie durch konvertierte relative Feldkalibrierungen ergänzt. Diese haben allerdings zwei gravierende Nachteile. Zum einen sind unterhalb von 10° Elevation keine Werte vorhanden (s. Abb. 5.4 und 5.5), und zum anderen weisen sie keine Azimutabhängigkeit auf. Das erste Problem wird von den meisten Softwarepaketen wohl dadurch behoben, daß der Korrekturwert für 10° auch auf kleinere Elevationswinkel angewandt wird. Strenggenommen sollte man aber gar keine GNSS-Daten verwenden, die unter Elevationen beobachtet wurden, für die man keine Antennenkorrekturen zur Verfügung hat.

5.1.5. Radomproblematik

Mit Radom (*radome*), einer Abkürzung des Begriffs *radar dome*, bezeichnet man jede Art von mikrowellendurchlässiger Haube, die zu Schutzzwecken über eine GNSS-Antenne „gestülpt“ werden kann. Radome können beispielsweise verhindern, daß sich größere Schneemengen auf den Antennen ansammeln, oder daß sie von Vögeln als Sitzwarte oder Brutplatz genutzt werden. Aus diesen Gründen sind sie auf Teilen der Erdoberfläche leider unverzichtbar, bringen aber den Nachteil mit sich, daß sich der Schätzwert für die entsprechende Stationshöhe u.U. um mehrere cm verändert (Braun et al., 1997; Schupler, 2001; Kaniuth und Stuber, 2002). Dies ist besonders dann verhängnisvoll, wenn verschiedene Raumverfahren mittels lokal gemessener Raumvektoren zwischen den jeweiligen Referenzpunkten verknüpft werden sollen (Ray und Altamimi, 2005; Ray et al., 2007). Um negative Einflüsse

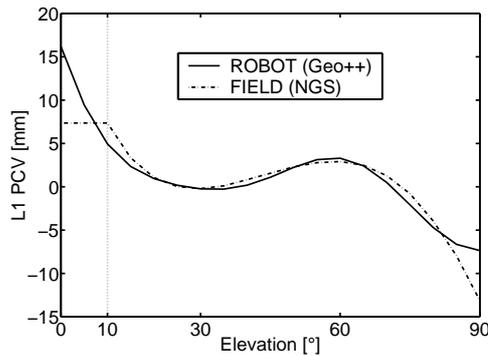


Abb. 5.4.: Vergleich der rein elevationsabhängigen L1 PCVs für die TRM14532.00: konvertierte Feldkalibrierung des NGS gegenüber Roboterkalibrierung der Geo++ GmbH.

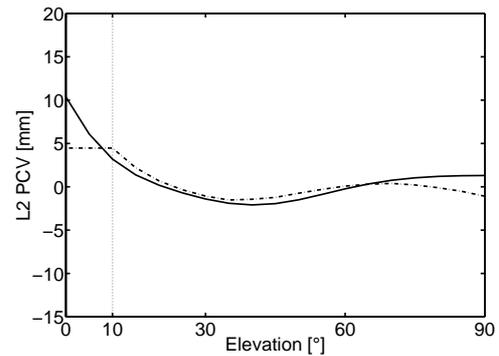


Abb. 5.5.: Vergleich der rein elevationsabhängigen L2 PCVs für die TRM14532.00: konvertierte Feldkalibrierung des NGS gegenüber Roboterkalibrierung der Geo++ GmbH.

zu minimieren, wird auf IGS-Stationen die Verwendung von sphärischen Radomen möglichst gleichmäßiger Dicke verlangt (Moore, 2006).

Der Einfluß eines Radoms auf das Phasenzentrum läßt sich am besten in Kombination mit der jeweiligen Antenne kalibrieren. Hierfür kommen alle in Kap. 5.1.3 vorgestellten Verfahren in Frage. Vermutlich aus Mangel an Korrekturwerten wurden Radome bei Einführung des relativen Phasenzentrumsmodells im Jahre 1996 vernachlässigt. Auch Antennen/Radom-Kombinationen, die später kalibriert wurden, fanden innerhalb des IGS nahezu keine Berücksichtigung (Gendt und Schmid, 2005). Um Sprünge in den Koordinatenzeitreihen zu vermeiden, wurden stattdessen in den meisten Fällen weiterhin die Korrekturwerte für die entsprechenden Antennen ohne Radom verwendet.

Erst mit Einführung des absoluten Antennenmodells im November 2006 wurden auch alle Radomkalibrierungen, die zu diesem Zeitpunkt bei Geo++ bzw. beim NGS verfügbar waren, offiziell vom IGS übernommen. Problem dabei ist jedoch, daß nur für ca. 30% der Antennen/Radom-Kombinationen, die im IGS-Netz vorhanden sind, überhaupt Korrekturwerte vorliegen. Damit sich diese Situation nicht weiter verschlechtern kann, ist es mittlerweile nicht mehr erlaubt, neue Radome ins IGS-Netz einzuführen, für die es keine Korrekturwerte gibt. Daneben ist man bestrebt, ausrangierte Antennen nachträglich zu kalibrieren, um die Werte für eine Neuverarbeitung der Beobachtungsdaten zur Verfügung zu haben (Moore, 2006).

Eine mögliche Lösung des Radomproblems könnte auch darin bestehen, Antenne und Radom isoliert voneinander zu betrachten, da man sich dann nicht mehr mit einer Unzahl von Kombinationsmöglichkeiten zwischen Antenne und Radom beschäftigen müßte. Unter den über 80 verschiedenen Antennen/Radom-Paaren, die bislang im IGS-Netz aufgetaucht sind, befinden sich aber immerhin noch 19 verschiedene Radomtypen. Bildet man die Differenz zwischen der Kalibrierung einer Antenne mit bzw. ohne Radom, so läßt sich der Einfluß des Radoms isolieren. Fraglich ist aber natürlich, ob sich ein bestimmtes Radom auf alle verschiedenen Antennentypen in gleicher Weise auswirkt.

Die Abb. 5.6 und 5.7 zeigen die Werte für das Radom SCIS, das für das *Southern California Integrated GPS Network* (SCIGN) entwickelt wurde. Drei der Kurven zeigen die Differenz zwischen konvertierten relativen Feldkalibrierungen, die Kurve mit Werten bis zum Horizont ist aus absoluten Roboterkalibrierungen abgeleitet. Die Übereinstimmung für L2 (Abb. 5.7) scheint im Rahmen der Kalibriergenauigkeit zu liegen (vgl. Kap. 5.1.4), im Falle von L1 (Abb. 5.6) hätte man dagegen deutlich kleinere Differenzen zwischen den verschiedenen Antennentypen erwartet. Da es sich bei allen vier Antennen um Chokering-Antennen handelt, scheint es allerdings ausgeschlossen, daß sich das SCIS-Radom auf die LEIAT504 tatsächlich anders als auf die übrigen Antennen auswirkt. Würde man nun ein Mittel dieser Werte auf eine andere Antenne übertragen, so wäre dies mit Sicherheit besser, als den Radom-Einfluß zu ignorieren. Im Vergleich zur direkten Kalibrierung von Antenne und Radom würde man aber wohl an Qualität einbüßen. Außerdem besteht das Problem, daß für die meisten Radomtypen nur ein oder zwei Einzelkalibrierungen vorliegen, und man deswegen nur schwer einen Eindruck von der Genauigkeit des isolierten Radomeinflusses gewinnen kann. Das Problem, elevationsabhängige Radom-PCVs auf die azimutabhängigen PCVs einer Antenne übertragen zu müssen, könnte man dadurch lösen, daß man von einem idealen rotations-symmetrischen Radom ausgeht und in allen Azimutrichtungen dieselbe Korrektur anbringt.

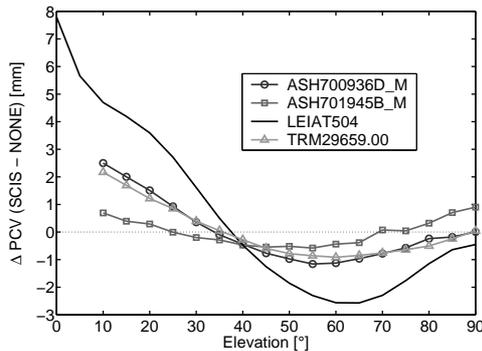


Abb. 5.6.: Einfluß des Radoms SCIS (SCIGN short antenna dome) auf das L1-Phasenzentrum verschiedener Antennen.

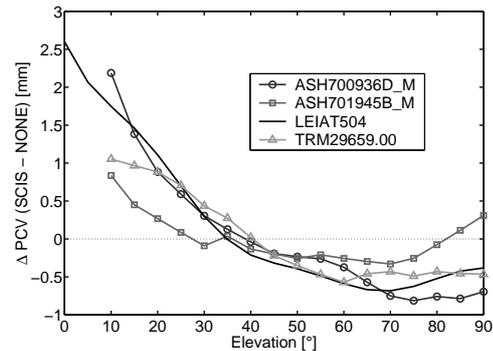


Abb. 5.7.: Einfluß des Radoms SCIS (SCIGN short antenna dome) auf das L2-Phasenzentrum verschiedener Antennen.

5.1.6. Spaceborne GNSS antennas

Nutzt ein tieffliegender Satellit GNSS, um seine Bahn zu bestimmen, so spricht man von *satellite-to-satellite tracking* im *high-low*-Modus. Da an Bord von Satelliten extreme Anforderungen zu erfüllen sind, kommen hier auch spezielle Antennen zum Einsatz, die aber ebenfalls kalibriert werden müssen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Antenne bereits vor dem Start am Erdboden nach den üblichen Verfahren zu kalibrieren. So untersuchten beispielsweise Dilkner et al. (2006) mit Hilfe des Roboters zwei verschiedene Antennentypen im Hinblick auf ihren möglichen Einsatz an Bord des Satelliten GOCE. Die Korrekturwerte für die BlackJack-Antenne an Bord von Jason-1 wurden dagegen vorab in einer Kammer ermittelt (Haines et al., 2004).

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Position des Phasenzentrums besteht in der Auswertung von GNSS-Meßdaten vom Einsatzort der Antenne. Haines et al. (2004) schätzten für die Jason-1-Antenne zunächst die Position des mittleren Phasenzentrums als Unbekannte bei der Bahnbestimmung mit. Die Eigenrotation des Satelliten erlaubt hierbei die Dekorrelation von Phasen- und Massenzentrum. Mit Hilfe der Residuen war es schließlich sogar möglich, richtungsabhängige Korrekturen für das Phasenzentrum zu bestimmen. Dabei wird wohl jedes einzelne Residuum einem bestimmten Bereich der Antennenhemisphäre zugeordnet, um schließlich über alle Residuen je Empfangsbereich mitteln zu können (vgl. Kap. 5.1.3).

Die Residuen der Trägerphasenbeobachtungen wurden auch von Montenbruck et al. (2009) zur Bestimmung von Antennenkorrekturwerten genutzt, und zwar für den Antennentyp an Bord von GRACE-B und TerraSAR-X. Dabei handelt es sich im Prinzip um die Antenne SEN67157514 der Firma Sensor Systems, die jedoch mit speziellen, für die Raumfahrt geeigneten, *choke rings* versehen wurde. Interessant an den Untersuchungen von Montenbruck et al. (2009) ist vor allem, daß bei einem Verzicht auf die aus einer Roboterkalibrierung stammenden a priori-Korrekturwerte offensichtlich nicht mehr die volle Phasenzentrumskorrektur gewonnen werden kann, wenn allein die Residuen ausgewertet werden.

5.2. Sendeantennen

Gemäß dem Navstar GPS Joint Program Office (2006) besteht das Raumsegment des GPS-Systems aus insgesamt 6 verschiedenen Satellitenblöcken (vgl. Tab. 5.2). Der letzte Block I-Satellit wurde jedoch bereits 1995 außer Betrieb genommen, und der erste Block IIF-Satellit wird frühestens 2009 in seine Umlaufbahn gebracht werden (weitere Planungen sehen den Start des ersten Block III-Satelliten für das Jahr 2013 vor). Damit umkreisten im Jahre 2006 also Satelliten aus vier verschiedenen Blöcken (II, IIA, IIR, IIR-M) die Erde. Anhand von Tab. 5.2 wird deutlich, daß die GPS-Betreiber nicht zwischen den herkömmlichen Block IIR-Satelliten und ihren modernisierten „Artgenossen“ (IIR-M; „M“ für *modernized*) unterscheiden, was die Satellitennummer (*space vehicle number* SVN) anbelangt. Hinzu kommt, daß die letzten vier Vertreter von Block IIR, die zwischen Dezember 2003 und November 2004 gestartet wurden, mit der verbesserten Sendeantenne nachgerüstet wurden, die eigentlich für die Block IIR-M-Satelliten entwickelt worden war (Marquis und Reigh, 2005). Aus diesem Grund beschloß der IGS, die Block IIR-Satelliten in zwei Gruppen zu unterteilen (IIR-A, IIR-B; Gendt und Schmid, 2005). Welcher Block IIR-Satellit zu welcher Untergruppe gehört, wird aus Tab. 5.3 ersichtlich. Zuguterletzt dürfen wir davon ausgehen, daß die Sendeantennen von Block II und IIA sowie von Block IIR-B und IIR-M jeweils identisch sind.

Beim russischen GLONASS-System unterscheidet man bislang drei verschiedene Satellitentypen: GLONASS, GLONASS-M (erster Start im Dezember 2003) und GLONASS-K (erster Start für 2010 geplant). Vom europä-

Tab. 5.2.: Offizielle Bezeichnungen für die verschiedenen Generationen von GPS-Satelliten (Navstar GPS Joint Program Office, 2006), Satellitennummern (SVN) und Hersteller. Der Prototyp (SVN12) ist im San Diego Air & Space Museum zu besichtigen. Die Geschäftsbereiche Luftfahrt- und Militärtechnik von Rockwell International wurden 1996 von Boeing aufgekauft^a.

Satellitentyp	SVN	Hersteller
Block I	1–11	Rockwell International
Block II	13–21	Rockwell International
Block IIA	22–40	Rockwell International
Block IIR	41–61	Lockheed Martin
Block IIR-M		Lockheed Martin
Block IIF	62–73	Boeing
Prototyp	12	Rockwell International

^a <http://www.boeing.com/history/>

Tab. 5.3.: IGS-Bezeichnungen für die Block IIR-Satelliten und die entsprechenden Satellitennummern (SVN; Marquis und Reigh, 2005).

Satellitentyp	SVN
Block IIR-A	41, 43–46, 51, 54, 56
Block IIR-B	47, 59–61
Block IIR-M	48–50, 52–53, 55, 57–58
Mißlungener Raketenstart	42

ischen Galileo-System befinden sich bislang lediglich zwei Testsatelliten (GIOVE-A und GIOVE-B; Gatti et al., 2006) im Orbit.

5.2.1. Aufbau und Funktion

Alle GPS-Satelliten aus Tab. 5.2, die bislang gestartet wurden, tragen Sendeantennen, die aus zwölf einzelnen Wendelantennen (*helical elements*) bestehen (Aparicio et al., 1995). Solche Wendelantennen, die zum Senden und Empfangen zirkular polarisierter elektromagnetischer Wellen verwendet werden können, bestehen aus schraubenförmig gewundenen Leitern. Bei einem Teil der Satelliten verjüngen sich diese Wendelantennen im Bereich der letzten zwei Windungen kegelförmig (*tapered element*, s. Abb. 5.8). Die zwölf Einzelantennen sind jeweils gleichabständig in zwei konzentrischen Kreisen angeordnet, wobei vier einen inneren und die acht verbleibenden einen äußeren Ring bilden (s. Abb. 5.9). Hinsichtlich der Radien der zwei Kreise sowie der Länge und des Radius der einzelnen Wendelantennen gibt es kleine Unterschiede zwischen den verschiedenen Satellitenblöcken. Auch die rückwärtige Metallfläche, die Nebenkeulen abschirmen soll, wurde im Laufe der Zeit modifiziert. Während diese bei Block I zylindrisch geformt war, wurde ab Block II auf eine konische Form zurückgegriffen (s. Abb. 5.8).

Im Hinblick auf azimutale Variationen des Phasenzentrums (s. Kap. 5.2.2) ist auch die Orientierung des Antennenkranzes in Bezug auf das Satellitenkoordinatensystem von Interesse. Anhand von Abb. 5.9 ist zu erkennen, daß die vier Antennenelemente des inneren Ringes bei Block I mit der y -Achse Winkel von 45° , 135° , 225° bzw. 315° einschließen (im Uhrzeigersinn gezählt). Für Block II lassen sich anhand einer Abbildung in Degnan und Pavlis

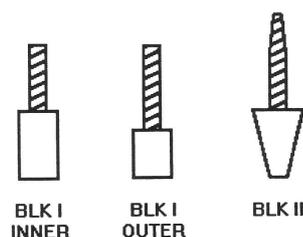


Abb. 5.8.: Helixelemente (Czopek und Shollenberger, 1993).

Tab. 5.4.: Maximal auftretende Nadirwinkel z'_{\max} bei der Abstrahlung des GPS-Signals für verschiedene LEO-Flughöhen.

Flughöhe [km]	z'_{\max}
200	14.72°
500	15.40°
1000	16.55°
1500	17.71°

(1994) Winkel von 67.5°, 157.5°, 247.5° bzw. 337.5° mutmaßen. Zu den anderen Satellitenantennen scheinen keine Informationen verfügbar zu sein.

Wichtigstes Ziel beim Betrieb der GPS-Sendeantennen ist es, den Empfang des Signals auf der gesamten Erdoberfläche mit einer möglichst gleichmäßigen Signalstärke zu ermöglichen. Da die Signalstärke mit wachsender Entfernung abnimmt, könnte dies jedoch nicht einfach dadurch realisiert werden, daß das Signal in alle Richtungen gleich stark abgestrahlt wird. Schließlich unterscheiden sich die Entfernungen zwischen Satellit und Empfänger für Beobachtungen im Zenit (kürzester Abstand) bzw. nahe des Horizonts (größter Abstand) um bis zu 5000 km. Für die Satellitenantenne bedeutet dies also, daß das GPS-Signal in Richtung des Erdmittelpunktes am schwächsten abgestrahlt werden muß, während die Signalstärke mit wachsendem Nadirwinkel bis zum Erdrand (EOE = *edge of Earth*) im Prinzip ständig zunehmen muß. Dies wird durch das Zusammenspiel von innerem und äußerem Ring erreicht, die das Signal um 180° phasenverschoben abstrahlen. Dabei werden die Elemente des inneren Rings mit 90% der Leistung, diejenigen des äußeren Rings mit 10% gespeist. Laut Czopek und Shollenberger (1993) wird das Maximum der Signalstärke bei einem Nadirwinkel von ungefähr 10° erreicht. Weicht eine einzelne Wendelantenne oder alle Antennen eines Rings von der Sollphase ab, so wirkt sich dies auf die Position des Phasenzentrums aus. Bereits Abweichungen von wenigen Grad können eine Verschiebung des Phasenzentrums um mehrere Dezimeter bewirken (Corey et al., 2002; Cardellach et al., 2007).

In diesem Zusammenhang ist es interessant zu wissen, unter welchem Öffnungswinkel die Erde (Äquatorradius $R_E \approx 6378$ km) aus der Bahnhöhe der Satelliten (nominelle große Halbachse $a \approx 26560$ km) überhaupt beobachtet werden kann. Zur Abschätzung des maximalen Nadirwinkels z'_{\max} , unter dem GPS-Signale noch einen Empfänger auf der Erdoberfläche erreichen können, kann folgende Gleichung verwendet werden (Schmid und Rothacher, 2003):

$$z'_{\max} = \arcsin \left(\frac{R_{\max}}{r_{\min}} \cdot \sin z_{\max} \right) \quad (5.12)$$

Der Nadirwinkel z' wird also umso größer, je größer der Abstand R der Beobachtungsstation vom Erdmittelpunkt, je kleiner der Bahnradius r des Satelliten und je größer der Zenitwinkel z , unter dem der Satellit von der Erde aus beobachtet wird. Angenommen, ein Empfänger würde sich in größtmöglicher Höhe befinden ($R_{\max} \approx 6387$ km) und einen Satelliten mit vergleichsweise großer Exzentrizität ($e_{\max} \approx 0.025$) nahe des Perigäums ($r_{\min} \approx 25896$ km) unter einem Elevationswinkel von 0° ($z_{\max} = 90^\circ$) beobachten, dann würde der Nadirwinkel z'_{\max} beim Satelliten ungefähr 14.28° betragen. Falls eine Elevationssschranke von 10° verwendet wird, sollten keine größeren Werte als etwa 14.06° für den Nadirwinkel auftreten.

Um auch tieffliegenden Satelliten (LEO = *low Earth orbiter*) die Ortung und Bahnbestimmung mit GPS zu ermöglichen, muß allerdings auch für weitaus größere Nadirwinkel eine angemessene Signalstärke erreicht werden. Tab. 5.4 zeigt, welche maximalen Nadirwinkel bei verschiedenen Flughöhen für einen LEO auftreten können. Vom Navstar GPS Joint Program Office (2006) wird für Block IIF-Satelliten bis zu einem Nadirwinkel von 23° eine bestimmte Signalstärke vorgeschrieben. Dies würde einer Flughöhe von etwa 3700 km entsprechen. Laut Marquis und Reigh (2005) erfüllen auch bereits die Block IIR-Satelliten diese Forderung.

Während über den Aufbau der GLONASS-Antennen nur wenig bekannt ist, unterscheiden sich die Galileo-Sendeantennen grundlegend von den GPS-Antennen. Für die beiden Testsatelliten GIOVE-A und GIOVE-B wurden unter Führung von Alcatel Alenia Space (Italien) bzw. EADS CASA (Spanien) parallel zwei unabhängige planare Antennen entwickelt (Benedicto et al., 2000; Coromina et al., 2004). Während EADS sog. *cavity-backed patch elements* einsetzt, bedient sich Alcatel sog. *stacked patches* (planare Leiterbahnstrukturen, die in Schichten übereinander angeordnet sind; Menge, 2003). Die WRAS-Antenne (*wideband radiator antenna subsystem*) von Alcatel verfügt über einen Durchmesser von 1.35 m und besteht aus 36 einzelnen Elementen (Valle et al., 2003; Gatti et al., 2006). Von diesen sind 20 in einem rechteckigen Raster um die Antennenmitte angeordnet. Die restlichen 16 bilden einen äußeren Ring, der phasenverschoben gespeist wird (s. Abb. 5.10). Die gesamte Antenne setzt sich aus vier völlig identischen Teilen zusammen, was die Herstellung deutlich erleichtert.

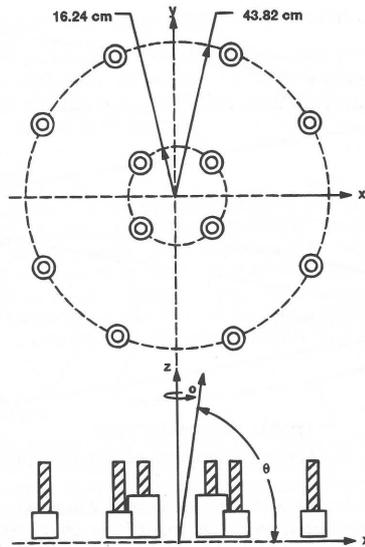


Abb. 5.9.: Aufbau einer Block I-Antenne (Czopek und Shollenberger, 1993).

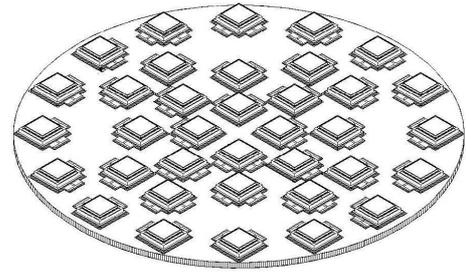


Abb. 5.10.: Aufbau der aus vier Modulen zusammengesetzten WRAS-Antenne des Galileo-Testsatelliten GIOVE-A (Valle et al., 2003).

5.2.2. Modellierung des Phasenzentrums

Genau wie bei den Empfangsantennen wird das Phasenzentrum der Satellitenantennen als Summe eines sog. Phasenzentrumsoffsets (PCO) \mathbf{X} und richtungsabhängiger Phasenzentrumsvariationen (PCVs) $\phi'(z', \alpha)$ beschrieben. Dabei definiert der Offset die Position des mittleren Phasenzentrums PC in Bezug auf das Massenzentrum CM (*center of mass*) des Satelliten, auf das sich wiederum die Satellitenbahnpositionen beziehen. Der Offset wird in einem rechtshändigen Koordinatensystem angegeben, dessen Ursprung im Massenzentrum liegt. Hierbei zeigt die z -Achse zum Erdmittelpunkt, die y -Achse (Rotationsachse der Sonnenkollektoren) entspricht dem Kreuzprodukt aus z -Achse und dem Vektor vom Satelliten zur Sonne und die x -Achse vervollständigt das Rechtssystem (Mancherorts sind Abweichungen von dieser IGS-Definition festzustellen. Die Herstellerangaben für GIOVE-A beziehen sich z.B. auf ein Koordinatensystem mit gespiegelter x - und y -Achse; Píriz et al., 2006). Würde sich die Position des Massenzentrums infolge von Treibstoffverbrauch bzw. Alterung des Satelliten spürbar verändern, wäre eine zeitliche Konstanz der PCOs nicht mehr gegeben (Cardellach et al., 2007). Die PCVs geben schließlich die Distanzkorrektur infolge einer Abweichung des tatsächlichen vom mittleren Phasenzentrum für eine bestimmte Abstrahlrichtung an, die durch den Nadirwinkel z' sowie das Azimut α definiert wird. Für die Satellitenantennenkorrekturen gilt im IGS folgende Vorzeichen-Konvention (ρ steht dabei für die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger; Rothacher und Schmid, 2006):

$$\text{PC} = \text{CM} + \text{PCO} \quad (5.13)$$

$$\rho_{\text{beobachtet}} = \rho_{\text{modelliert}} + \text{PCV} + \text{weitere Korrekturen} \quad (5.14)$$

Der PCO und die zugehörigen PCVs sind stark miteinander korreliert (vgl. Gleichung (5.4)). So besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Offset in z -Richtung und nadirabhängigen PCVs $\phi'(z', \alpha_0)$ auf der einen Seite sowie zwischen den „horizontalen“ Offsets (x - und y -Komponente) und azimutabhängigen Variationen $\phi'(z'_0, \alpha)$ auf der anderen. Verändert man den Offset in Nadirrichtung um den Betrag Δz , so wirkt sich dies in einer cosinusförmigen Änderung $\Delta\phi'(z', \alpha_0)$ der nadirabhängigen PCVs aus (Schmid und Rothacher, 2003):

$$\Delta\phi'(z', \alpha_0) = -\Delta z \cdot (1 - \cos z') + \Delta\phi_0 \quad (5.15)$$

$\Delta\phi_0$ ist dabei wiederum eine beliebige Additionskonstante. Aufgrund des verhältnismäßig kleinen Wertebereiches für den Nadirwinkel z' (s. Kap. 5.2.1) sind relativ große Änderungen des Offsets notwendig, um eine spürbare Veränderung der PCVs zu erzielen. Verschiebt man das mittlere Phasenzentrum beispielsweise um 1 m in Richtung des Satelliten, so wirkt sich dies mit maximal ca. 3 cm auf die nadirabhängigen PCVs aus (vgl. Abb. 5.11 bzw. Cardellach et al., 2007). Dies liegt vor allem daran, daß aufgrund des schmalen Öffnungswinkels eine Verschiebung des Phasenzentrums Δz kaum von einem Satellitenuhrfehler zu unterscheiden ist. Wird ein Versatz

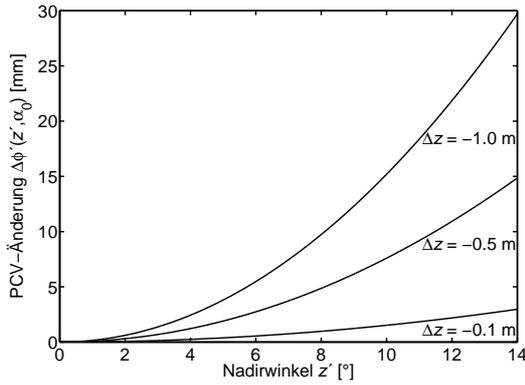


Abb. 5.11.: Änderung $\Delta\phi'(z', \alpha_0)$ [mm] der nadirabhängigen PCVs aufgrund vorgegebener Offsetänderungen Δz [m].

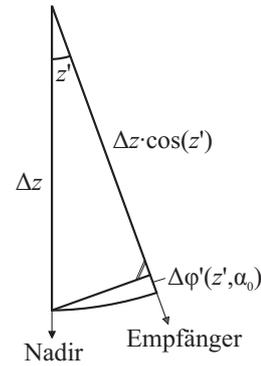


Abb. 5.12.: PCV-Änderung $\Delta\phi'(z', \alpha_0)$ infolge radialer Verschiebung des Phasenzentrums Δz .

der Satellitenuhr gegenüber der GNSS-Systemzeit mitbestimmt, so wird Δz bei einer Abstrahlung des Signals in Nadirrichtung vollständig von diesem absorbiert. Für alle Nadirwinkel z' ungleich Null zeigt sich die Differenz zwischen Δz und $\Delta z \cdot \cos z'$ (Projektion von Δz auf die Abstrahlrichtung) als Variation des Phasenzentrums (vgl. Abb. 5.12).

Um den Zusammenhang zwischen einem Versatz des Phasenzentrums in der xy -Ebene und azimutabhängigen PCVs beschreiben zu können, ist es notwendig, die Zählung des Azimuts α für die Antenne an Bord des Satelliten zu definieren. In Analogie zur Empfängerantenne, wo das Azimut im Uhrzeigersinn von Norden in Richtung Osten gezählt wird, liegt eine mögliche Festlegung darin, ebenfalls im Uhrzeigersinn von der y -Achse im Satellitenkoordinatensystem (Rotationsachse der Sonnenkollektoren) in Richtung der x -Achse zu zählen (s. Abb. 5.13). Bei beiden Definitionen blickt man dabei entgegen der z -Richtung. Da die beiden Antennen entgegengesetzt ausgerichtet sind, erfolgt die Zählung der jeweiligen Azimutwinkel im Prinzip in gegenläufiger Richtung. Verwendet man die y -Achse als Bezugsachse für die Zählung des Azimuts, so muß natürlich die Lage (*attitude*) des Satelliten und damit die Ausrichtung der Achsen bekannt sein.

Weicht nun eine gewählte Festlegung der Position des Phasenzentrums um $(\Delta x, \Delta y)$ von der tatsächlichen Position ab (s. Abb. 5.13), so äußert sich dies in den unterschiedlichen „horizontalen“ Richtungen in einer Abhängigkeit vom Cosinus der Differenz aus Offsetrichtung α_Δ und Abstrahlrichtung α (Schmid et al., 2005b):

$$\Delta xy(\alpha) = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \cos(\alpha_\Delta - \alpha) \quad (5.16)$$

Dabei beschreibt α_Δ das Azimut, in dem sich das verschobene Phasenzentrum vom tatsächlichen aus gesehen befindet. Aus Gleichung (5.16) wird deutlich, daß in Richtung $\alpha = \alpha_\Delta$ der Einfluß eines ungeschickt gewählten Phasenzentrums maximal wird, während die Azimutrichtungen senkrecht zu α_Δ überhaupt nicht betroffen sind. Abb. 5.14 zeigt schließlich, wie sich die verbleibende „horizontale“ Komponente $\Delta xy(\alpha)$ auf die eigentliche Beobachtung auswirkt. Wie zu erwarten, spielt die Festlegung der Position des Phasenzentrums in der xy -Ebene für Beobachtungen in Nadirrichtung keine Rolle. Je größer jedoch der Nadirwinkel z' wird, desto größer wird auch der Einfluß einer ungeschickten Wahl des Phasenzentrums auf die Beobachtungen. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß sich ein Fehler in der „horizontalen“ Lage des Phasenzentrums einer Satellitenantenne als Cosinus-Schwingung in den azimutalen PCVs äußert. Die Größe der Amplitude ist dabei vom Nadirwinkel z' abhängig (Schmid et al., 2005b):

$$\Delta\phi'(z', \alpha) = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \sin z' \cdot \cos\left(\arctan \frac{\Delta x}{\Delta y} - \alpha\right) \quad (5.17)$$

Die Abb. 5.15 und 5.16 verdeutlichen einerseits die Abhängigkeit der Amplitude der azimutalen PCVs vom Nadirwinkel z' , andererseits veranschaulichen sie aber auch das Zustandekommen der Phasenverschiebung. Liegt ein Versatz des Phasenzentrums in x -Richtung vor, so treten die größten PCVs ebenfalls in Richtung der x -Achse auf ($\alpha = 90^\circ$ bzw. $\alpha = 270^\circ$; s. Abb. 5.15). Dagegen sorgt ein Versatz Δy für Maximalwerte in Richtung $\alpha = 0^\circ$ bzw. $\alpha = 180^\circ$ (s. Abb. 5.16).

Liegen Schätzwerte $\Delta\phi'(z'_0, \alpha)$ mit $z'_0 > 0$ für die azimutalen PCVs vor, so lassen sich daraus Korrekturen für das Phasenzentrum ableiten. Hierfür muß aus den PCVs im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung zunächst

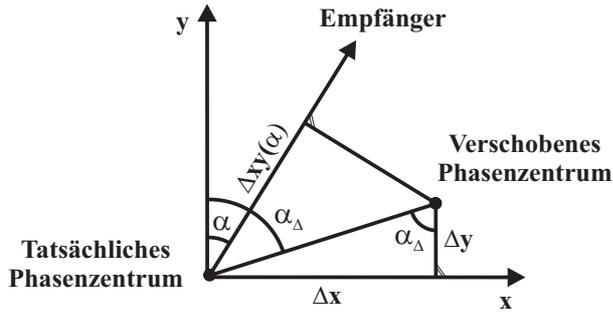


Abb. 5.13.: Zusammenhang zwischen einem Versatz des Phasenzentrums (Δx , Δy) und der Azimutrichtung α .

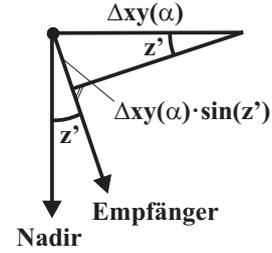


Abb. 5.14.: Zusammenhang zwischen einem Versatz des Phasenzentrums $\Delta xy(\alpha)$ in der xy -Ebene (vgl. Abb. 5.13) und der Nadirrichtung z' .

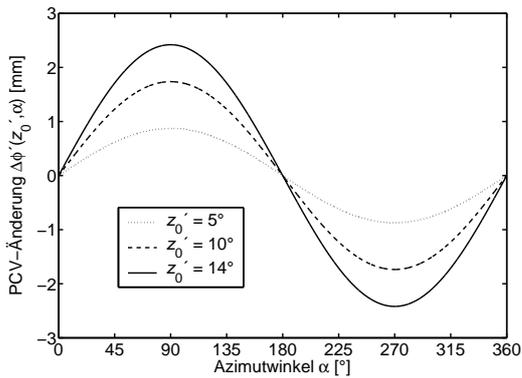


Abb. 5.15.: Änderung $\Delta\phi'(z'_0, \alpha)$ der azimuthalen PCVs aufgrund einer „horizontalen“ Offsetänderung von ($\Delta x = 10$ mm, $\Delta y = 0$ mm).

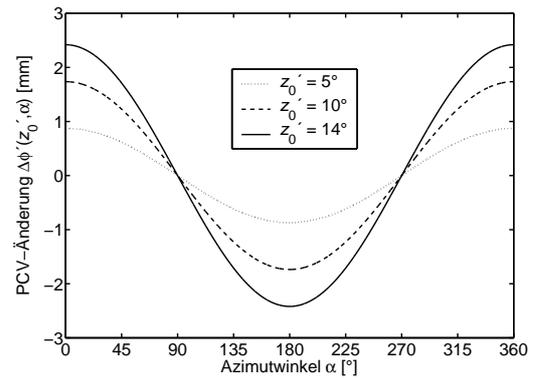


Abb. 5.16.: Änderung $\Delta\phi'(z'_0, \alpha)$ der azimuthalen PCVs aufgrund einer „horizontalen“ Offsetänderung von ($\Delta x = 0$ mm, $\Delta y = 10$ mm).

eine bestmöglich angepasste Cosinus-Schwingung mit der Amplitude A und der Phasenverschiebung α_Δ geschätzt werden:

$$f(\alpha) = A \cdot \cos(\alpha_\Delta - \alpha) \tag{5.18}$$

Daraus läßt sich schließlich der Versatz berechnen, um den sich die Position des Phasenzentrums von seiner bestmöglichen Lagerung unterscheidet. Möchte man diesen Versatz korrigieren, so sind die Offsets in x - und y -Richtung mit umgekehrtem Vorzeichen an den Koordinaten des Phasenzentrums anzubringen (Schmid et al., 2005b).

$$\Delta x = \frac{A}{\sin z'_0} \cdot \sin \alpha_\Delta \tag{5.19}$$

$$\Delta y = \frac{A}{\sin z'_0} \cdot \cos \alpha_\Delta \tag{5.20}$$

5.2.3. Zusammenhang mit den Empfangsantennen

Zwischen dem Zenitwinkel z , unter dem eine GNSS-Antenne auf der Erde einen Satelliten beobachtet, und dem entsprechenden Nadirwinkel z' beim Satelliten besteht (unter Annahme einer kugelförmigen Erde) ein einfacher Zusammenhang (Rothacher, 2001):

$$\sin z' = \frac{R}{r} \sin z \tag{5.21}$$

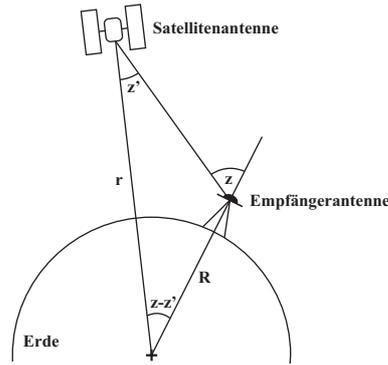


Abb. 5.17.: Zusammenhang zwischen dem Zenitwinkel z und dem Nadirwinkel z' .

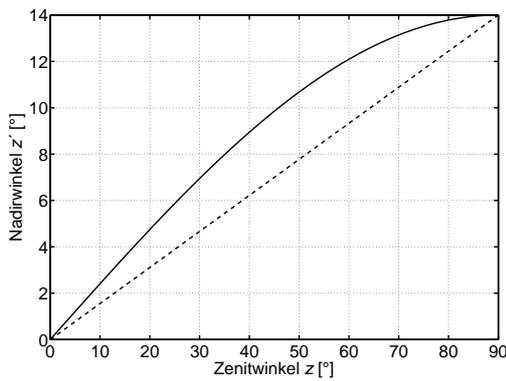


Abb. 5.18.: Nadirwinkel z' in Abhängigkeit des Zenitwinkels z im Vergleich zu einem linearen Zusammenhang.

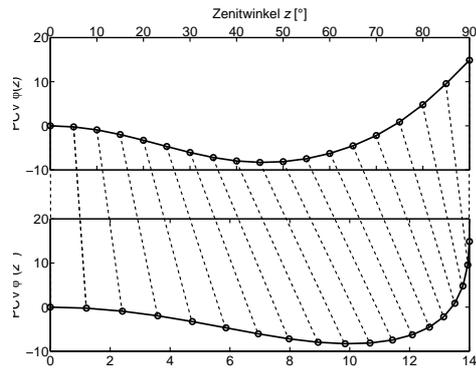


Abb. 5.19.: Absolute PCVs $\phi(z)$ der Empfängerantenne AOAD/M_T (oben) ausgedrückt als PCVs einer Satellitenantenne $\phi'(z')$ (unten).

R ist dabei der Erdradius und r der Bahnradius des Satelliten (vgl. Abb. 5.17). Benutzt man diese Faustformel zur Berechnung des Nadirwinkels z' , so lassen sich die elevationsabhängigen PCVs $\phi(z)$ jeder beliebigen Empfangsantenne auch als nadirabhängige PCVs $\phi'(z')$ der Satellitenantenne ausdrücken:

$$\phi'(z') = \phi' \left(\arcsin \left(\frac{R}{r} \sin z \right) \right) = \phi(z) \tag{5.22}$$

Abb. 5.19 zeigt, daß dabei die Kurve für große Nadirwinkel z' ein wenig gestaucht wird. Dies liegt daran, daß zwischen z und z' kein linearer Zusammenhang besteht (s. Abb. 5.18). Verändert man die PCVs einer der beiden Antennen, so wirkt sich dies mit umgekehrtem Vorzeichen auf die entsprechend andere Antenne aus (Schmid und Rothacher, 2003):

$$\Delta\phi'(z') = -\Delta\phi(z) \tag{5.23}$$

5.2.4. Probleme beim Schätzen von Satellitenantennenkorrekturen

Singularität bei der PCV-Schätzung

Aufgrund der Tatsache, daß das Phasenzentrum stark mit der Satellitenuhr korreliert ist (vgl. Kap. 5.2.2), läßt sich das absolute Niveau der Phasenzentrumskorrekturen nicht festlegen. Um eine Singularität zu vermeiden, ist es notwendig, bei der Schätzung eine zusätzliche Bedingung einzuführen. Eine Möglichkeit bestünde darin, für den PCV-Wert in Nadirrichtung den Wert Null zu erzwingen. Allgemein üblich ist jedoch, einen mittleren PCV-Wert von Null zu verlangen, da dadurch die PCV-Werte insgesamt so klein wie möglich werden:

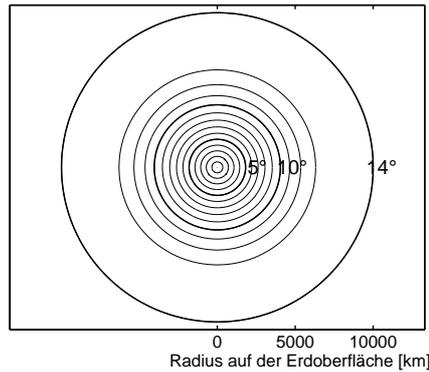


Abb. 5.20.: Erdhalbkugel zerlegt in Kreisringe, die von benachbarten ganzzahligen Nadirwinkeln ausgeschnitten werden ($U_{\text{Erde}}/4 \approx 10000 \text{ km}$).

$$\sum_{z'=0^\circ}^{14^\circ} \phi'(z') = 0 \quad (5.24)$$

Würde man das Niveau der PCVs um einen bestimmten Betrag verschieben, so würde dieser Wert vollständig von der Satellitenuhr kompensiert werden. Schätzt man elevations- und azimutabhängige PCVs in Form von Polygonen (vgl. Kap. 5.1.2), so sollte zusätzlich ein identischer Wert in Nadirrichtung für jedes einzelne Azimut erzwungen werden.

Ungleichmäßige Beobachtungsverteilung

Um die Qualität von geschätzten Phasenzentrumskorrekturen für die Satellitenantenne beurteilen zu können, ist es notwendig, eine Vorstellung von der Verteilung der GNSS-Beobachtungen in Bezug auf die unterschiedlichen Abstrahlrichtungen zu haben. Hierzu wird für jede Beobachtung, die von einem Stationsnetz auf der Erde registriert wird, der Nadir- und Azimutwinkel ermittelt, unter dem das empfangene Signal den Satelliten verlassen hat.

Wie Abb. 5.21 zeigt, ist die Verteilung in Bezug auf den Nadirwinkel sehr ungleichmäßig, was beispielsweise die Bestimmung von PCV-Werten für kleine Nadirwinkel erschwert. Die ungleichmäßige Verteilung hängt damit zusammen, daß benachbarte ganzzahlige Nadirwinkel jeweils Kreisringe auf der Erde „ausleuchten“, deren Fläche mit zunehmendem Nadirwinkel immer größer wird (vgl. Abb. 5.20 sowie schwarze Linie in Abb. 5.21). Und da bei größer werdender Fläche die Wahrscheinlichkeit steigt, daß eine bestimmte Beobachtungsstation in den entsprechenden Bereich hineinfällt, steigt die Anzahl der Beobachtungen in Abb. 5.21 bis zu einem Nadirwinkel von ca. 10° auch nahezu proportional zur Fläche des Kreisrings.

Darüber hinaus bleibt die Zunahme der Beobachtungen jedoch hinter derjenigen der Fläche zurück. Dies dürfte damit zusammenhängen, daß in hohen nördlichen bzw. südlichen Breiten kaum Beobachtungsstationen vorhanden sind, während gleichzeitig die Bodenspuren der Satelliten nie über eine Breite von $\pm 55^\circ$ hinausreichen. Bemerkenswert an Abb. 5.21 ist außerdem, daß die Anzahl der Beobachtungen oberhalb von 13.5° rückläufig ist, obwohl Beobachtungen bis zu einer Elevation von 3° berücksichtigt sind, was Nadirwinkeln von 13.5° bis 14.3° entspricht. Dies liegt einerseits daran, daß nicht auf allen Beobachtungsstationen auch tatsächlich Daten bis zu einer Elevation von 3° aufgezeichnet wurden, und daß dies teilweise auch durch Abschattungen verhindert wird. Andererseits müssen auch eine ganze Reihe von Faktoren zusammentreffen, um Beobachtungen unter möglichst großen Nadirwinkeln zu ermöglichen (vgl. Kap. 5.2.1).

Auch die Verteilung der Beobachtungen in Bezug auf das Azimut (Winkel gegenüber der y -Achse, vgl. Kap. 5.2.2) ist relativ ungleichmäßig, zumindest solange man einzelne Satelliten betrachtet. Abb. 5.22 zeigt für sechs aufeinanderfolgende Tage, wie viele Beobachtungen bei einem GPS-Satelliten jeweils in ein Intervall von 10° fallen sowie das Mittel über die sechs Tage. Es fällt auf, daß ein Teil der Antenne nur spärlich mit Beobachtungen abgedeckt ist, obwohl ein globales Stationsnetz zugrunde liegt. Da sich dieses Muster, zumindest über kurze Zeiträume, auch noch von Tag zu Tag wiederholt, kann die Bestimmung von PCV-Werten in diesen Bereichen schwierig werden. Will man die wenigen Beobachtungen gleichzeitig noch auf mehrere Intervalle in Nadirrichtung aufteilen, kann dies unter Umständen sogar unmöglich werden.

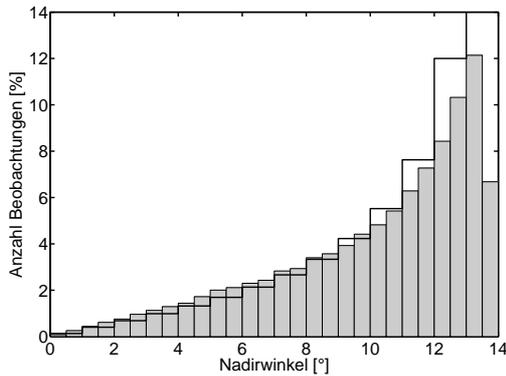


Abb. 5.21.: Verteilung der Beobachtungen aller Satelliten einer globalen GPS-Eintageslösung (19. Juli 2002) in Abhängigkeit vom Nadirwinkel (minimaler Elevationswinkel: 3°). Die schwarze Linie beschreibt das Flächenverhältnis der Kreisringe aus Abb. 5.20 (Schmid und Rothacher, 2003).

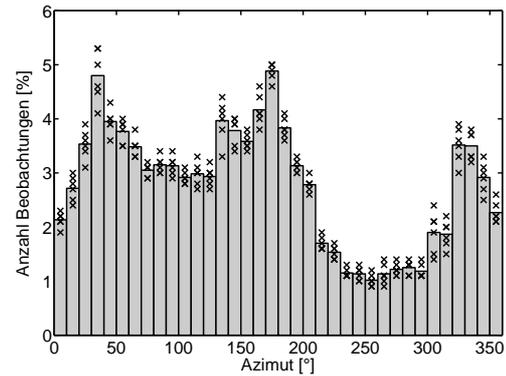


Abb. 5.22.: Mittlere Verteilung (14. – 19. Juli 2002) der Beobachtungen des GPS-Satelliten PRN28 in Abhängigkeit vom Azimut. Die Kreuze zeigen die Wiederholung der Verteilung an den einzelnen Tagen (Schmid et al., 2005b).

Direkte/indirekte Offset-Schätzung

In globalen GNSS-Lösungen können sowohl die Koordinaten des mittleren Phasenzentrums (Offset gegenüber dem Massenzentrum) als auch die Variationen (PCVs) desselben in Abhängigkeit der Aussenderichtung mitgeschätzt werden, aufgrund der starken Korrelation zwischen den beiden Parametergruppen (s. Kap. 5.2.2) jedoch niemals gleichzeitig. Da aber das Resultat für die PCVs aus einer vermittelnden Ausgleichung den Einfluß eines Versatzes des Phasenzentrums in vollem Umfang enthält, ist es möglich, dieses Gesamtergebnis hinterher in Offset und PCVs aufzuspalten. Diese Vorgehensweise wird im folgenden als „indirekte Offset-Schätzung“ bezeichnet.

Für den Fall azimuthaler PCVs wurde in Kap. 5.2.2 bereits erläutert, daß unter Verwendung von Amplitude und Phasenverschiebung einer bestmöglich angepaßten Cosinus-Schwingung mit Hilfe der Gleichungen (5.19) und (5.20) die Offset-Werte in x - bzw. y -Richtung bestimmt werden können. Im Falle von nadirabhängigen PCVs ist es möglich, eine ausgleichende Funktion (vgl. Gleichung (5.15))

$$f(z') = -\Delta z \cdot (1 - \cos z') \quad (5.25)$$

zu bestimmen, welche die Offset-Korrektur Δz in z -Richtung direkt enthält. Da das absolute Niveau der PCVs beliebig festgelegt werden kann, sollte in beiden Fällen bei der Schätzung der ausgleichenden Schwingung eine Additionskonstante zugelassen werden.

Problematisch in diesem Zusammenhang ist nun vor allem die oben beschriebene ungleichmäßige Beobachtungsverteilung. Wird der Versatz in z -Richtung direkt aus den Beobachtungen bestimmt, so hängt das Resultat vorwiegend von Beobachtungen ab, die einen Nadirwinkel von mehr als 10° aufweisen (vgl. Abb. 5.21). Ermittelt man jedoch zunächst aus allen Beobachtungen eine mittlere PCV-Kurve und approximiert diese durch eine Cosinus-Funktion nach Gleichung (5.25), so sind plötzlich alle Wertebereiche des Nadirwinkels gleichberechtigt, sofern man nicht die formalen Fehler der einzelnen Werte der PCV-Kurve berücksichtigt. Andererseits könnte das Umgehen der Häufung von Beobachtungen im Bereich großer Nadirwinkel aber auch als Vorteil der indirekten Offset-Schätzung angesehen werden. Jedenfalls ist klar, daß sich die Resultate merklich unterscheiden können. Für die GPS-Satelliten wurden je nach Satellitenblock Unterschiede von 20–50 cm zwischen direkter und indirekter Schätzung festgestellt.

Ein ähnliches Problem besteht bei der Schätzung von x - und y -Offsets aus azimuthalen PCVs. Auch hier ist denkbar, daß eine ungleichmäßige Verteilung der Beobachtungen (s. Abb. 5.22) bei der direkten Schätzung einen systematischen Einfluß auf das Ergebnis hat, der verhindert werden kann, indem zunächst eine mittlere PCV-Kurve aus allen Beobachtungen bestimmt wird, die schließlich durch eine Cosinus-Schwingung gemäß Gleichung (5.18) approximiert werden kann. Bei der indirekten Bestimmung von Offsets aus PCV-Werten ist in jedem Fall auch die Konsistenz der beiden Parametertypen garantiert.

Abhängigkeit vom maximalen Nadirwinkel

Von Bedeutung für die Schätzung eines z -Offsets ist auch der maximale Nadirwinkel z'_{\max} . Liegen LEO-Beobachtungsdaten vor, so können größere Nadirwinkel auftreten als in einem rein terrestrischen Netz (vgl. Tab. 5.4).

Kommen jedoch zusätzliche Teile der Satellitenantenne ins Spiel, ändert sich auch die Aufteilung in PCO und PCV. Solange die Konsistenz zwischen PCO und PCV gewahrt wird, kann dies nicht zu Problemen führen. Schwierig sind allein Vergleiche zwischen unterschiedlichen Phasenzentrumsmodellen (vgl. JPL-Werte in Tab. 5.5). Choi (2002) geht beispielsweise bei der Block IIF-M-Antenne davon aus, daß eine Vergrößerung des Nadirwinkels auch mit einer Vergrößerung des z -Offsets einhergeht.

Korrelation mit dem terrestrischen Maßstab

Laut Zhu et al. (2003a) sind die Maßstabsdifferenzen zwischen GPS und den anderen geodätischen Raumverfahren (z.B. Altamimi et al., 2002) zu einem großen Teil durch die ungenaue Kenntnis der Position des Phasenzentrums der GPS-Sendeantennen in z -Richtung zu erklären. Da sich darüberhinaus die Satellitenkonstellation durch das Stilllegen alter und den Start neuer Satelliten permanent ändert, scheint dies auch die Ursache für auftretende Änderungsraten des terrestrischen Maßstabs in globalen GPS-Lösungen zu sein. Testrechnungen von Zhu et al. (2003a) zeigen, daß sich Änderungen Δz des Offsets mit ca. 5% auf die Stationshöhen in einem globalen Netz auswirken, was in folgender Faustformel mündet:

$$\Delta h \approx -0.05 \cdot \Delta z \quad (5.26)$$

Da gleichzeitig eine Maßstabsänderung von 1 ppb in einem globalen Netz durch eine Änderung aller Stationshöhen um ca. 6.4 mm ($10^{-9} \cdot R_E \approx 6.4$ mm) ausgedrückt werden kann, läßt sich auch ein Zusammenhang zwischen Δz und einer Änderung Δs des globalen terrestrischen Maßstabs formulieren:

$$\Delta s \text{ [ppb]} \approx -7.8 \cdot \Delta z \text{ [m]} \quad (5.27)$$

Eine Änderung Δz aller Satellitenantennen-Offsets von 1 m würde sich also mit $\Delta s \approx 7.8$ ppb im globalen Maßstab bzw. mit $\Delta h \approx 5$ cm in den Stationshöhen auswirken. Infolge der Korrelation zwischen PCO und PCV (vgl. Gleichung (5.15)) besteht natürlich auch ein Zusammenhang zwischen den PCVs und dem Maßstab. Aufgrund dieser Korrelationen kommt man nicht umhin, den terrestrischen Maßstab beim Schätzen von Phasenzentrumskorrekturen zu fixieren (vgl. hierzu auch Springer, 2000b), wodurch man Werte erhält, die mit dem vorgegebenen Maßstab konsistent sind. Dies bedeutet jedoch auf der anderen Seite, daß der globale GNSS-Maßstab mit Vorsicht zu genießen ist, solange keine unabhängigen Kalibrierungen für das Phasenzentrum der Satellitenantennen vorliegen. Notwendig wäre hier eine Kalibrierung der Antennen bereits vor dem Satellitenstart, wobei ein voller Satz von Korrekturwerten (PCO und PCV) gewonnen werden müßte. Offsets allein, so wie bislang von den GPS-Betreibern bereitgestellt, wären keinesfalls ausreichend.

Korrelationen mit Bahnparametern

Ein weiteres Problem besteht in der hohen Korrelation der Position des Phasenzentrums mit den Parametern zur Beschreibung der Bahn der GNSS-Satelliten. Zeigt beispielsweise die x -Achse im Satellitenkoordinatensystem in Flugrichtung, so kann nicht zwischen einem Versatz des Phasenzentrums in x -Richtung und einer Verschiebung des Massenzentrums des Satelliten (*along-track*-Komponente) in der entgegengesetzten Richtung unterschieden werden. Da sich geozentrische Koordinaten für den Satelliten auf das Massenzentrum beziehen, kann in diesem Fall also entweder das Phasenzentrum innerhalb des Satelliten oder gleich der komplette Satellit entlang der Bahn verschoben werden. Da die GPS-Satelliten ständig rotieren, um die z -Achse auf die Erde und die Sonnenkollektoren in Richtung der Sonne auszurichten, ist die oben angesprochene Konstellation jedoch nie von Dauer. Verwendet man allerdings zu wenige Beobachtungsdaten, so wird die gleichzeitige Schätzung von Phasenzentrums- und Bahnparametern singulär.

Da die Ausrichtung der Koordinatenachsen des Satelliten sowie die erforderlichen Rotationen um die betreffenden Achsen im wesentlichen von der Stellung der Satellitenbahnebene bezüglich der Sonne abhängen, besteht auch eine Korrelation mit dem Elevationswinkel β_0 der Sonne gegenüber der Bahnebene. Dieser läßt sich aus der Rektaszension α_\odot und Deklination δ_\odot der Sonne sowie aus der Bahnneigung i und Rektaszension des aufsteigenden Bahnknotens Ω des jeweiligen Satelliten berechnen (Schmid et al., 2007):

$$\beta_0 = 90^\circ - \arccos \left(\begin{bmatrix} \sin i \cdot \sin \Omega \\ -\sin i \cdot \cos \Omega \\ \cos i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta_\odot \cdot \cos \alpha_\odot \\ \cos \delta_\odot \cdot \sin \alpha_\odot \\ \sin \delta_\odot \end{bmatrix} \right) \quad (5.28)$$

Schmid et al. (2007) zeigen, daß mit abnehmendem β_0 -Winkel die Genauigkeit der x - und y -Komponente des Phasenzentrums steigt. Vor allem in y -Richtung ist es bei großem β_0 -Winkel äußerst schwierig, Massen- und Phasenzentrum zu dekorrelieren.

Ein weiterer sichtbarer Effekt hängt mit der Präzession der Rektaszension des aufsteigenden Bahnknotens $\dot{\Omega}$ der Satelliten zusammen. Unter der Annahme einer Kreisbahn (Exzentrizität $e = 0$) geben Montenbruck und Gill (2000) hierfür folgende Gleichung an:

$$\dot{\Omega} = -3\pi \frac{J_2}{T} \left(\frac{R_E}{a} \right)^2 \cdot \cos i \quad (5.29)$$

Dabei ist J_2 die Abplattung der Erde, T die Umlaufzeit des Satelliten, R_E der Erdradius, a die große Halbachse und i die Inklination der Satellitenbahn. Würde sich die Rektaszension des aufsteigenden Bahnknotens Ω nicht ändern, so würde sich die Ausrichtung der sechs GPS-Bahnebenen bezüglich der Sonne alle 12 Monate wiederholen. Aufgrund der Änderungsrate $\dot{\Omega}_{\text{GPS}}$ ist jedoch die tatsächliche Zeitspanne T_R bis zum Auftreten einer identischen Konstellation um einige Tage kürzer:

$$T_R = \frac{2\pi}{2\pi - \dot{\Omega}_{\text{GPS}} \cdot 1 \text{ a}} \cdot 365.25 \text{ d} \approx 351.5 \text{ d} \quad (5.30)$$

Im Prinzip wiederholt sich auch nach einem Sechstel von T_R bereits die Konstellation der Bahnen bezüglich der Sonne, allerdings jeweils mit unterschiedlichen Bahnebenen. Infolgedessen lassen sich in Zeitreihen von Phasenzentrums-Offsets in der Regel Signale mit Perioden von T_R/n , $n = 1, \dots, 6$ finden, für die es keinerlei physikalische Erklärung gibt. Bei diesen Signalen handelt es sich vielmehr um Artefakte der Bahnmodellierung (Schmid et al., 2007).

Erdschattendurchgänge

Geraten GPS-Satelliten in den Erdschatten, so versagen die Sonnensensoren den Dienst, weswegen die Sonnenkollektoren nicht mehr koordiniert nachgeführt werden können. Im Falle von Block II/IIA veranlaßt die Lageregelung den Satelliten, mit bis zu $0.13^\circ/\text{s}$ um die z -Achse zu rotieren, um den Satelliten dadurch zu stabilisieren (Bar-Sever, 1996; Hugentobler et al., 2003). Diese Rotation wird von GNSS-Softwarepaketen bislang in der Regel nicht berücksichtigt, weshalb die Orientierung des Satelliten so lange unbekannt ist, bis er den Erdschatten wieder verlassen hat. Genaugenommen erreichen die Satelliten sogar erst etwa 30 Minuten nach dem Austritt aus dem Schatten wieder ihre nominelle Lage (*attitude*; Springer, 2000a). Sämtliche Daten, die aus diesem Zeitraum stammen, sollten also nicht zur Bestimmung von Phasenzentrumspositionen verwendet werden. Tut man dies dennoch, so muß mit einer Verfälschung des Versatzes in x -Richtung um mehrere cm gerechnet werden (Schmid et al., 2007). Bei Block IIR-Satelliten besteht das Problem unkontrollierten Rotierens offenbar nicht mehr (Bar-Sever, 1997).

5.2.5. Vergleich verschiedener Lösungen

PCOs der Systembetreiber

Offsetwerte für das Phasenzentrum der GPS-Satellitenantennen gibt es aus verschiedensten Quellen. Ein Satz von Werten stammt vom *GPS Operational Control Segment* (OCS), also von den Systembetreibern selbst. Diese sind auf der Homepage² der NIMA-Nachfolgeorganisation NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) verfügbar. Es ist jedoch weder dokumentiert, für welche Frequenz diese Werte gelten sollen, noch, nach welchem Verfahren sie ermittelt wurden. Menge (2003) vermutet, daß die Offsetwerte auf Nahfeldmessungen in einer Kammer oder aber auf rein theoretischen Überlegungen zum Sendeverhalten der Antennen basieren könnten. Laut Choi (2002) wurde die Phasenzentrumsposition für die Block IIA-Antennen rechnerisch anhand von Simulationen ermittelt (Love, 1984, unveröffentlicht). Kammerkalibrierungen für Antennen des Typs IIF-M wurden in Point Mugu (Kalifornien) vorgenommen (Choi, 2002), die übrigen Satellitenblöcke sind unklar.

Seltsam ist in jedem Fall, daß teilweise Jahre nach dem Satellitenstart noch Werte korrigiert wurden, so z.B. am 1. Februar 2001 (Menge, 2003). Da man in den Anfangsjahren des GPS-Systems noch in anderen Genauigkeitskategorien dachte, spielte die Kalibrierung des Phasenzentrums, zumindest für die ersten Satelliten, wohl nicht die große Rolle. Jedenfalls wurde bis einschließlich Block IIA nur ein mittlerer Offsetwert je Satellitenblock

²<http://earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/documentation.html>

angegeben. Seit dem ersten Start eines Block IIR-Satelliten stehen dagegen individuelle Werte für jeden Satelliten zur Verfügung (s. Tab. 5.5).

Die Betreiber des Galileo-Systems scheinen von Beginn an stärker für die Frage nach der Phasenzentrumsposition sensibilisiert zu sein. Für GIOVE-A und GIOVE-B geben Zandbergen und Navarro (2006) jedenfalls gesonderte PCOs für drei Trägerfrequenzen (E5a+E5b, E6, E2/L1/E1) an. Da das zugehörige Satellitenkoordinatensystem nicht im Massenzentrum gelagert zu sein scheint, müssen jeweils noch die Koordinaten desselben abgezogen werden. Píriz et al. (2006) geben den PCO von GIOVE-A gegenüber dem Massenzentrum für eine ionosphärenfreie Linearkombination aus E2/L1/E1 und E5a+E5b an.

Relative PCO-Konvention des IGS

Innerhalb des IGS gab es zunächst keine Festlegung einheitlicher Offsetwerte, was vor allem zu Problemen bei der Erzeugung konsistenter Uhrenresultate führte. Ein Teil der Analysezentren orientierte sich an den IERS Standards (McCarthy, 1992), ein anderer an den Werten des OCS. Als die Angaben zum Offset des ersten Block IIR-Satelliten widersprüchlich waren (Bar-Sever, 1997), versuchten einige IGS-Analysezentren, z -Offsets für alle Satelliten aus den Beobachtungsdaten zu schätzen. Da die auftretenden Differenzen zwischen einzelnen baugleichen Satelliten zu groß erschienen, und außerdem *biases* zwischen den Lösungen der verschiedenen Analysezentren auftraten (Bar-Sever, 1998), entschied man sich, weiterhin mittlere Offsets je Block zu verwenden und die bis dahin gebräuchlichen Werte möglichst beizubehalten (s. Tab. 5.5). Im Falle des einzigen Block IIR-Satelliten ergaben die Schätzungen einen negativen Offset, was von der Erde aus gesehen einem Phasenzentrum auf der Rückseite der physikalischen Antenne entsprochen hätte. Da der Schätzwert stark von den Angaben des OCS abwich, wurde ein Offset von Null vereinbart (Kouba, 2003). Diese Konvention des IGS für die Satellitenantennen, die mehr oder weniger konsistent war mit dem relativen Korrekturmodell `igs_01.pcv` für die Empfangsantennen, galt ab dem 29. November 1998 und wurde erst am 6. November 2006 durch das neue absolute Modell mit individuellen z -Offsets für jeden Satelliten abgelöst.

Relativkalibrierung einer Sendeantenne am Boden

Mader und Czopek (2002) unternahmen den Versuch, eine am Boden verbliebene Block IIA-Antenne durch Feldmessungen zu kalibrieren. Da die Satellitenantenne nicht nach Corbin zur NGS-Eichstrecke transportiert werden konnte (vgl. Kap. 5.1.3), wurde eine relative Feldkalibrierung auf dem Dach eines Gebäudes der Firma Boeing durchgeführt. Dies wurde dadurch ermöglicht, daß die Satellitenantenne auch als Empfangsantenne betrieben werden konnte. Einziges Problem war die Tatsache, daß der eigentliche Arbeitsbereich der Antenne von ca. $\pm 14^\circ$ einen zu kleinen Teil des Himmels ausgeschnitten hätte, um eine ausreichende Zahl gleichzeitig beobachteter Satelliten zu gewährleisten. Stattdessen wurde eine Elevationsschranke von 60° gewählt, was einem Öffnungswinkel von $\pm 30^\circ$ entspricht. Satelliten neuerer Generationen sind immerhin für einen Betrieb bis mindestens $\pm 23^\circ$ ausgelegt (vgl. Kap. 5.2.1), bei der Block IIA-Antenne könnte die getroffene Maßnahme jedoch zu einer Verfälschung der Resultate geführt haben. Während für die Referenzantenne absolute Phasenzentrumskorrekturen angebracht wurden, ergab sich für die Satellitenantenne ein deutlich von der IGS-Konvention abweichender Wert (s. Tab. 5.5). Die damals geplanten Kalibrierungen von Block IIR-Antennen wurden wohl bislang nicht realisiert.

Absolutkalibrierung einer Sendeantenne am Boden

Mit Unterstützung des NGS gelang es, die von Mader und Czopek (2002) auf dem Boeing-Gelände kalibrierte Block IIA-Antenne nach Garbsen/Hannover zum Kalibrierroboter der Firma Geo++ GmbH zu befördern (vgl. Kap. 5.1.3). Da die Satellitenantenne deutlich größere Ausmaße als die sonst auf dem Roboter kalibrierten Empfangsantennen aufweist, waren eine spezielle Halterung sowie eine „sanftere“ Steuerung des Roboters notwendig. Außerdem mußten die von der Satellitenantenne empfangenen GPS-Signale mit Hilfe eines Vorverstärkers an die vom Empfänger erwartete Signalstärke angepaßt werden (Wübbena et al., 2007).

Die eigentliche Kalibrierung wurde in der Zeit vom 11. bis zum 14. September 2007 vorgenommen. Mit dem Ziel, möglichst viele „nadirnahe“ Einzelbeobachtungen zu realisieren, wurde die Antenne dabei um bis zu 25° verkippt. Aufgezeichnet wurden zunächst alle Beobachtungen oberhalb einer Elevation von 30° , was einem Nadirwinkel von 60° entsprechen würde. Zur Bestimmung der horizontalen Offsets (gegenüber der gewählten Rotationsachse) wurden die gesamten Daten verwendet, der vertikale z -Offset beruht dagegen allein auf denjenigen Beobachtungen, die höchstens einen Nadirwinkel von 15° aufweisen und damit in den Arbeitsbereich der Antenne fallen.

Während Mader und Czopek (2002) nur Offsets in z -Richtung ermitteln konnten, gelang Wübbena et al. (2007) eine vollständige Bestimmung der PCVs in Nadir- und Azimutrichtung. Addiert man zu dem von Wübbena et al.

Tab. 5.5.: z -Offsets [cm] für GPS-Satelliten (space vehicle number SVN bzw. pseudo-random noise number PRN) aus verschiedenen Quellen im Vergleich (Stand: 31.12.06): OCS-Werte, relatives IGS-Modell, Mader und Czopek (2002), absolutes IGS-Modell (*: vorläufige Festlegung), aus azimutalen PCVs des JPL abgeleitete Werte unter Verwendung unterschiedlicher maximaler Nadirwinkel z'_{\max} , Bar-Sever et al. (2006). Mittelwert und Streuung für die verschiedenen Satellitenblöcke sind fettgedruckt. Die Werte der rechten fünf Spalten gelten für die ionosphärenfreie Linearkombination LC, bei den linken beiden Spalten ist die Frequenz unklar.

Satellit	PRN	OCS	IGS relativ	Mader (2002)	IGS absolut	JPL $z'_{\max} = 14^\circ$	JPL $z'_{\max} = 16^\circ$	Bar-Sever (2006)
Block I			85.4		172.5 \pm 3.4			
SVN09	13				174.1			
SVN10	12				174.8			
SVN11	03				168.6			
Block II/IIA		95.19	102.3	166.0	239.6 \pm 15.6	153.4 \pm 14.5	182.4 \pm 10.4	196.0 \pm 5.0
SVN13	02				253.0	156.4	179.5	
SVN14	14				264.4			
SVN15	15				231.2	143.2	172.4	
SVN16	16				236.4			
SVN17	17				225.3	137.6	167.5	
SVN18	18				238.9			
SVN19	19				274.4			
SVN20	20				241.6			
SVN21	21				234.4			
SVN22	22				226.7	142.7	168.3	
SVN23	23				257.5	174.3	196.6	
SVN24	24				245.5	167.4	191.0	
SVN25	25				229.5	139.3	169.5	
SVN26	26				230.7	145.8	180.6	
SVN27	27				247.2	165.4	190.1	
SVN28	28				220.5			
SVN29	29				235.2	153.8	184.5	
SVN30	30				246.6	153.5	182.6	
SVN31	31				210.7	127.1	166.3	
SVN32	01				220.1	141.9	174.2	
SVN33	03				261.9	178.1	201.9	
SVN34	04				227.9	150.7	183.6	
SVN35	05				246.3	157.8	185.4	
SVN36	06				267.6	184.3	198.2	
SVN37	07				222.0	140.7	177.8	
SVN38	08				240.5	161.4	193.8	
SVN39	09				234.0	146.1	179.8	
SVN40	10				238.9	154.6	187.0	
Block IIR-A		158.85 \pm 5.17	0.0		114.5 \pm 14.1	34.3 \pm 11.5	64.1 \pm 8.8	49.0 \pm 6.0
SVN41	14	161.37			117.8	39.2	67.9	
SVN43	13	161.40			120.3	40.6	68.8	
SVN44	28	151.31			91.1	9.8	46.7	
SVN45	21	158.40			130.0	36.4	62.3	
SVN46	11	151.41			97.1	27.2	65.0	
SVN51	20	161.40			115.4	45.0	74.7	
SVN54	18	159.23			113.3	32.4	57.0	
SVN56	16	166.30			130.7	43.7	70.3	
Block IIR-B/M		-4.164 \pm 5.869	0.0		68.2 \pm 7.0	-18.4 \pm 10.7	43.1 \pm 34.4	124.0 \pm 13.0
SVN47	22	5.980			79.2	-13.0	60.9	
SVN52	31	-5.750			(*) 75.0			
SVN53	17	-10.060			64.5			
SVN58	12	-9.355			(*) 70.0			
SVN59	19	-1.800			66.8	-8.6	66.4	
SVN60	23	0.040			60.2	-18.9	53.0	
SVN61	02	-8.200			61.4	-33.2	-7.9	

(2007) angegebenen LC-Offset in z -Richtung von 97.5 cm gegenüber der Oberfläche der Antennen-Grundplatte die von Mader und Czopek (2002) angegebene Differenz von 71.8 cm zwischen Antennen-Grundplatte und Massezentrum des Satelliten, so erhält man mit 169.3 cm nahezu denselben Wert wie Mader und Czopek (2002) (vgl. Tab. 5.5).

Absolute PCV-Schätzung aus globalen Beobachtungen durch GFZ und TUM

Schmid und Rothacher (2003) demonstrierten mit der *Bernese GPS Software* (Hugentobler et al., 2001) die Möglichkeit, aus den Daten des globalen IGS-Netzes PCV-Werte für die GPS-Satellitenantennen zu schätzen, und zwar gemeinsam mit Troposphären-, Bahn- und Erdrotationsparametern. Letzteres ist notwendig, falls die a priori-Werte auf einem anderen Modell für das Phasenzentrum beruhen. Aufgrund der Korrelation des Phasenzentrums mit den Stationshöhen (s. Kap. 5.2.4) ist es zudem nötig, den globalen Maßstab zu fixieren, um eine Singularität des Normalgleichungssystems zu vermeiden. Da in globalen Lösungen die ionosphärenfreie Linearkombination zum Einsatz kommt, um die ionosphärische Refraktion zu eliminieren, kann auf diesem Wege nur das Phasenzentrum der Linearkombination LC ermittelt werden. Schmid und Rothacher (2003) fixierten den Maßstab des globalen Bezugssystems ITRF2000, der sich auf VLBI- und SLR-Messungen stützt. Außerdem führten sie für die Empfangsantennen absolute Roboterkalibrierungen der Firma Geo++ GmbH ein (s. Kap. 5.1.3), um dadurch konsistente Korrekturwerte für die Satellitenantennen zu erhalten. Indirekt konnten aus den nadirabhängigen PCVs schließlich auch Korrekturen für die PCOs in z -Richtung abgeleitet werden (vgl. Kap. 5.2.4). Anhand der Beobachtungen von rund 100 IGS-Stationen zu allen aktiven Satelliten während eines nur sechstägigen Zeitraums im Juli 2002 ergaben sich blockspezifische z -Offsets für die Satellitenblöcke II/IIA bzw. IIR-A, die bereits sehr gut mit dem späteren absoluten IGS-Modell übereinstimmten ($z_{II/IIA} = 233.8$ cm, $z_{IIR-A} = 133.3$ cm; vgl. Tab. 5.5). Vom damals gültigen relativen IGS-Modell wichen die Werte jedoch um mehr als 1 m ab. Mit Hilfe eines neuntägigen Datensatzes aus dem Jahre 1994 konnte mit $z_I = 200.3$ cm später auch ein Wert für Block I angegeben werden (Schmid et al., 2005b).

Ge und Gendt (2005) modifizierten die EPOS.P.V2-Software (*Earth parameters and orbit determination system*) des GFZ Potsdam (Gendt et al., 1994), um ebenfalls Phasenzentrumskorrekturen für die Satellitenantennen schätzen und damit die Werte von Schmid und Rothacher (2003) validieren zu können. Die Auswertestrategie war zwar sehr ähnlich, doch ohne die Bestätigung der Werte durch ein unabhängiges Softwarepaket hätte sich das absolute Modell wohl kaum durchsetzen können. Die wesentlichen Unterschiede bestanden in der Verwendung einer höheren Mindestelevation sowie eines verbesserten Korrekturmodells für das Phasenzentrum der Empfangsantennen, das inzwischen verfügbar war. Außerdem wurden die PCVs der Satellitenantennen in der EPOS-Software als stückweise konstante Funktionen modelliert, im Gegensatz zu stückweise linearen Funktionen in der *Bernese GPS Software* (Schmid et al., 2005a). Anhand eines 35-tägigen Datensatzes aus dem Jahre 2003, der Beobachtungen zweier neu gestarteter Satelliten enthielt, darunter der erste Block IIR-B-Satellit mit modernisierter Sendeantenne, konnten Ge und Gendt (2005) folgende Werte für die z -Offsets ermitteln: $z_{II/IIA} = 245.8$ cm, $z_{IIR-A} = 155.3$ cm. Damit wurde die relativ große Differenz gegenüber dem relativen IGS-Modell bestätigt, und auch die blockspezifischen PCVs von GFZ und TUM stimmten hervorragend überein. Darüber hinaus zeigte sich, daß sich die Antennen an Bord der Block IIR-B-Satelliten völlig anders als die Block IIR-A-Antennen verhielten, was vom relativen IGS-Modell nicht berücksichtigt wurde. Noch wichtiger aber war wohl die Erkenntnis, daß die Phasenzentrumskorrekturen einzelner Satelliten signifikant voneinander abwichen. Während zunächst noch an eine Gruppierung von Satelliten mit ähnlichem Verhalten gedacht wurde (Schmid et al., 2005a; Ge und Gendt, 2005), ging man sehr bald zu satellitenspezifischen Korrekturen über. Solche könnten auf konstruktionsbedingte Unterschiede zwischen den Satelliten oder auf Mängel in der Generierung der Sollphasenverschiebung zwischen den einzelnen Antennenelementen zurückzuführen sein (vgl. Kap. 5.2.1).

Erste Zeitreihen satellitenspezifischer z -Offsets, die sich aus der Neuverarbeitung globaler GPS-Netze ergaben (Ge et al., 2005; Steigenberger et al., 2006), wiesen jedoch beachtliche signifikante Trends sowie langperiodische Signale auf. Aufgrund dessen sind zur Bestimmung satellitenspezifischer Korrekturwerte möglichst lange Zeitreihen erforderlich, um zumindest die periodischen Fehleranteile durch Mittelbildung weitestgehend eliminieren zu können. Ursachen für diese Signale könnten nicht modellierte Loading- oder Multipath-Effekte sowie Unzulänglichkeiten der Bahnmodellierung oder Troposphären-Mapping-Funktionen sein. Nachdem vom IGS-Workshop und -Symposium in Bern empfohlen worden war, einen konsistenten Satz absoluter Phasenzentrumskorrekturen für Sende- und Empfangsantennen zusammenzustellen, um diesen den Analysezentren zu Tests zur Verfügung stellen zu können (Schmid et al., 2005a), entschlossen sich die TU München (TUM) sowie das GFZ Potsdam dazu, GPS-Beobachtungsdaten seit der offiziellen Gründung des IGS im Jahre 1994 neu zu verarbeiten. Auf diese Weise sollten für jeden in diesem Zeitraum aktiven Satelliten zwei unabhängige Resultate gewonnen werden, um diese anschließend zu einem IGS-Korrekturdatensatz zu kombinieren. Unabhängigkeit der Resultate war insofern ge-

geben, als zwei verschiedene Stationsnetze mit unterschiedlichen Strategien und eigenständigen Softwarepaketen ausgewertet wurden. Weitere Details können Schmid et al. (2007) entnommen werden.

Entscheidend war noch die Frage, nach welchen Kriterien die Gesamtkorrektur in PCO und PCVs unterteilt, und ob tatsächlich beide Teilgrößen zwingend satellitenspezifisch definiert werden sollten. Solange man PCO und PCVs konsistent hält, ist die Aufteilung im Prinzip beliebig, da ein direkter Zusammenhang zwischen den beiden Größen besteht (vgl. Gleichung (5.15)). In Anbetracht der Tatsache, daß vermutlich mehr Softwarepakete mit PCOs der Satellitenantennen umgehen können als mit den entsprechenden PCVs, wurden in jeder Eintageslösung die PCVs jedes einzelnen Satelliten minimiert, indem der Offseteinfluß vollständig herausgerechnet wurde. Dabei zeigte sich dann eine hervorragende Übereinstimmung der PCV-Werte aufeinanderfolgender Tage für einzelne Satelliten sowie auch zwischen Satelliten desselben Blocks. Durch Festlegung blockspezifischer PCVs, die durch Mittelung über alle Satelliten des jeweiligen Blocks gewonnen wurden, konnte die Zahl festzulegender Modellparameter beträchtlich reduziert werden. Abb. 5.26 zeigt das Mittel aus der GFZ- sowie der TUM-Lösung, die jeweils auf Daten von mehr als 10 Jahren beruhen, unter der Bezeichnung „absolutes IGS-Modell“. Die Fehlerbalken zeigen dabei die Differenz zwischen den beiden Einzellösungen: im Mittel 0.6 mm für Block I, 0.3 mm für Block II/IIA, 1.1 mm für Block IIR-A und 0.2 mm für Block IIR-B (Schmid et al., 2007).

Bei einer erneuten Verarbeitung aller Daten wurden die gemittelten blockspezifischen PCVs als bekannt eingeführt und festgehalten, während satellitenspezifische PCOs auf direktem Wege geschätzt wurden. Die sich daraus ergebenden z -Offsets unterschieden sich infolgedessen um bis zu 50 cm von den indirekt ermittelten Werten des vorangegangenen Programmlaufs (vgl. Kap. 5.2.4). Daneben wurde von den neu geschätzten z -Offsets zumindest aber auch ein Teil der Abweichung satellitenspezifischer PCVs vom Blockmittelwert aufgenommen. Wie bereits erwähnt, wiesen die Zeitreihen der z -Offsets zum Teil beträchtliche Trends von mehreren Zentimetern pro Jahr auf. Der mittlere Trend von ca. 2 cm/a läßt sich durch den Fehler der mittleren vertikalen Geschwindigkeit des Referenzrahmens IGB00 von 0.8 mm/a erklären (Ray et al., 2004). Beim IGB00 handelt es sich um eine Realisierung des ITRF2000, deren Maßstab von GFZ und TUM fixiert wurde. Um den Einfluß der Trends auf spätere Resultate zu minimieren, wurden alle Offsets auf die Epoche 2000.0 bezogen, bevor schlußendlich wieder zwischen der GFZ- und der TUM-Schätzung gemittelt wurde. Die Differenz zwischen beiden Lösungen betrug im Mittel +4 cm (bei einer Streuung von 6 cm), wobei sich einzelne Satelliten um bis zu 70 cm von Vertretern desselben Blocks unterschieden. Die Differenz zwischen GFZ und TUM für jeden einzelnen Satelliten ist in Schmid et al. (2007) enthalten, Tab. 5.5 zeigt alle Mittelwerte. Seit 5. November 2006 sind die satellitenspezifischen z -Offsets zusammen mit den blockspezifischen PCVs Teil des offiziellen IGS-Antennenkorrekturmodells `igs05_www.atx`. x - und y -Offsets wurden zwar ebenfalls ermittelt, da die Abweichungen von den nominellen Werten jedoch nicht signifikant erschienen, wurden letztere beibehalten. Außerdem sollten die Offsets in x - und y -Richtung — aufgrund der hohen Korrelation — im Zusammenhang mit azimutalen PCVs behandelt werden (vgl. Gleichung (5.17)).

Absolute PCV-Schätzung aus LEO-Daten durch JPL

Einen anderen Ansatz zur Bestimmung von Korrekturen der Sendeantennen verfolgten Haines et al. (2004) am JPL. Zunächst nutzten sie die bei der Bahnbestimmung anfallenden Residuen zur Bestimmung azimutaler PCVs der Empfangsantennen an Bord von Jason-1 sowie der beiden GRACE-Satelliten (vgl. Kap. 5.1.3 und 5.1.6). In einem nächsten Schritt wurden die Residuen um die sog. *PCV maps* der Empfangsantennen korrigiert, um die verbleibenden Residuen schließlich den Aussenderichtungen jeder einzelnen GPS-Satellitenantenne zuzuordnen. Durch eine Art Mittelung über bestimmte Sektoren der Antennenhemisphäre (*residual stacking approach*) entstanden dann azimutale PCVs der Sendeantennen. Mit Hilfe der Beobachtungsdaten seit dem Start der beiden Missionen in den Jahren 2001 (Jason-1) bzw. 2002 (GRACE) können ständig verbesserte Antennenkorrekturen für die aktiven Satelliten abgeleitet werden. Auf der JPL-Homepage³ ist ein Satz von Korrekturen verfügbar, der sich auf Haines et al. (2005) bezieht und auf Beobachtungsdaten der Jahre 2003 und 2004 beruht.

Durch die Verwendung von LEOs anstatt terrestrischer Beobachtungsstationen ergibt sich der Vorteil, daß die troposphärische Refraktion, die stark mit den Antennenkorrekturen korreliert ist, hier keine Rolle spielt, und daß der Multipath-Einfluß geringer ist. Außerdem treten Beobachtungen mit größerem Nadirwinkel auf als auf der Erdoberfläche (vgl. Tab. 5.4), weswegen PCV-Werte für große Nadirwinkel mit höherer Genauigkeit bestimmbar sind. Einen Nachteil kann man darin sehen, daß jede LEO-Mission von beschränkter Dauer ist, weswegen es zu Inkonsistenzen kommen könnte, wenn PCVs unterschiedlicher Satellitenantennen auf den Beobachtungsdaten verschiedener LEOs beruhen. Außerdem ist es nicht möglich, Werte für bereits nicht mehr aktive Satelliten zu gewinnen, die aber für die Wiederverarbeitung archivierter Daten dringend notwendig sind. Als nachteilig kann man evtl. auch bewerten, daß die PCVs der Satellitenantennen von einer einzigen Empfangsantenne abhängig sind, wodurch sich Fehler in deren Kalibrierung systematisch auswirken können. Bei einem terrestrischen Stationsnetz

³ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/gipsy_products/Antenna_Maps

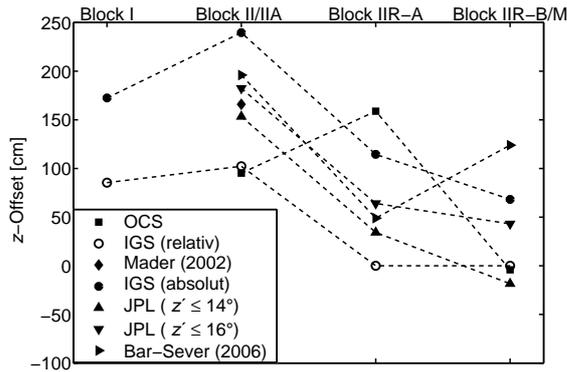


Abb. 5.23.: Graphischer Vergleich aller z -Offset-Mittelwerte [cm] aus Tab. 5.5 für die verschiedenen GPS-Satellitenblöcke.

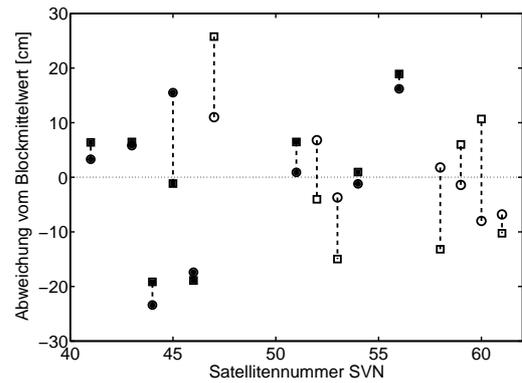


Abb. 5.24.: Abweichung [cm] des z -Offsets der Block IIR-Satelliten vom Blockmittelwert aus Tab. 5.5: absolutes IGS-Modell (Kreise) sowie mit dem Faktor 2.54 skalierte Werte des OCS (Quadrate). Block IIR ist unterteilt in Block IIR-A (ausgefüllte Symbole) und Block IIR-B/M (nicht ausgefüllt).

ist dagegen davon auszugehen, daß Kalibrierungsfehler einzelner Antennen aufgrund der Vielzahl verschiedener Antennen keinen großen Einfluß haben. In jedem Fall kann festgehalten werden, daß es sich beim Ansatz des JPL um ein unabhängiges Schätzverfahren für die Korrekturwerte der Satellitenantennen handelt. Umso erfreulicher ist die später gezeigte gute Übereinstimmung der Resultate.

Die Antennenkorrekturwerte des JPL können nicht direkt mit den übrigen Werten verglichen werden. Die azimutabhängigen *PCV maps* beziehen sich auf JPL-eigene PCOs, die sich leicht von den innerhalb des IGS vereinbarten relativen Werten (vgl. Tab. 5.5) unterscheiden. Sie verfügen außerdem über eine Auflösung von 2° in Nadir- sowie 5° in Azimutrichtung und erreichen einen maximalen Nadirwinkel von 16° . Bei den veröffentlichten azimutalen PCVs handelt es sich um „rohe“ Schätzwerte, was bedeutet, daß weder eine Mittelung über baugleiche Satelliten vorgenommen, noch der Einfluß eines verbesserungsfähigen PCOs berücksichtigt wurde. Um die Werte zu erhalten, die in Tab. 5.5 aufgeführt sind, wurde zunächst ein maximaler Nadirwinkel z'_{\max} gewählt (14° bzw. 16°), um dann durch Mittelung in Azimutrichtung rein nadirabhängige PCVs zu erhalten. Hierbei spielt es keine große Rolle, ob die Genauigkeiten jedes einzelnen PCV-Wertes bei der Mittelbildung berücksichtigt werden oder nicht. Mit Hilfe von Gleichung (5.15) wurden aus den PCVs indirekt PCO-Korrekturen abgeleitet, die schließlich mit umgekehrtem Vorzeichen an den a priori-Werten angebracht wurden. Bei der Schätzung von Δz aus den nadirabhängigen PCVs wurde jeder PCV-Wert gleich stark gewichtet. Im Gegensatz dazu verwendeten Bar-Sever et al. (2006) wohl eine Gewichtung nach der Anzahl der Beobachtungen bzw. nach der mit dem Nadirwinkel zunehmenden Fläche der einzelnen Segmente der Antennenhemisphäre, um die in Tab. 5.5 angegebenen Werte zu erhalten. Außerdem scheint ein maximaler Nadirwinkel von 15° berücksichtigt worden zu sein (Y. Bar-Sever, pers. Mitteilung).

Vergleiche von z -Offsets und nadirabhängigen PCVs

Vergleicht man zunächst die Blockmittelwerte aus Tab. 5.5, so kann man erkennen, daß Block IIR-B/M in allen Modellen mit Ausnahme von Bar-Sever et al. (2006) über den kleinsten Offset in z -Richtung verfügt, während Block II/IIA in allen Modellen mit Ausnahme der OCS-Werte den größten z -Offset aufweist. Ein Blick auf Abb. 5.23 verdeutlicht, daß zwei Offset-Werte nicht recht ins Bild passen wollen. Sowohl der Wert des OCS für Block IIR-A als auch der Wert von Bar-Sever et al. (2006) für Block IIR-B/M erscheinen im Vergleich zu den anderen Modellen zu groß. Der letzte Wert läßt sich dadurch erklären, daß einerseits im Vergleich zu den anderen Satellitentypen bei Block IIR-B/M sehr große PCV-Werte im Bereich des maximalen Nadirwinkels auftreten (vgl. Abb. 5.26), und daß sich diese andererseits in Zusammenhang mit der Beobachtungsverteilung in Nadirrichtung (vgl. Abb. 5.21) aufgrund der oben angesprochenen Gewichtung stark auf das Resultat auswirken können. Die scheinbare Abweichung dieses Offsetwertes ist jedoch unproblematisch, solange er konsistent mit den zugehörigen PCVs verwendet wird. Im Falle des OCS-Wertes für Block IIR-A gilt dies dagegen nicht, da eine Änderung des Phasenzentrums mit dem Nadirwinkel hier ganz vernachlässigt ist. Aussagen zur Ursache des stark von den anderen Modellen abweichenden z -Offsets sind jedoch schwierig, da nicht einmal dessen Herkunft geklärt ist.

In Anbetracht der Tatsache, daß ein konstanter Versatz in den z -Offsets aller Satellitenblöcke durch einen Maßstabsunterschied im globalen Netz erklärt werden kann (vgl. Gleichung (5.27)), scheinen die verschiedenen Modelle

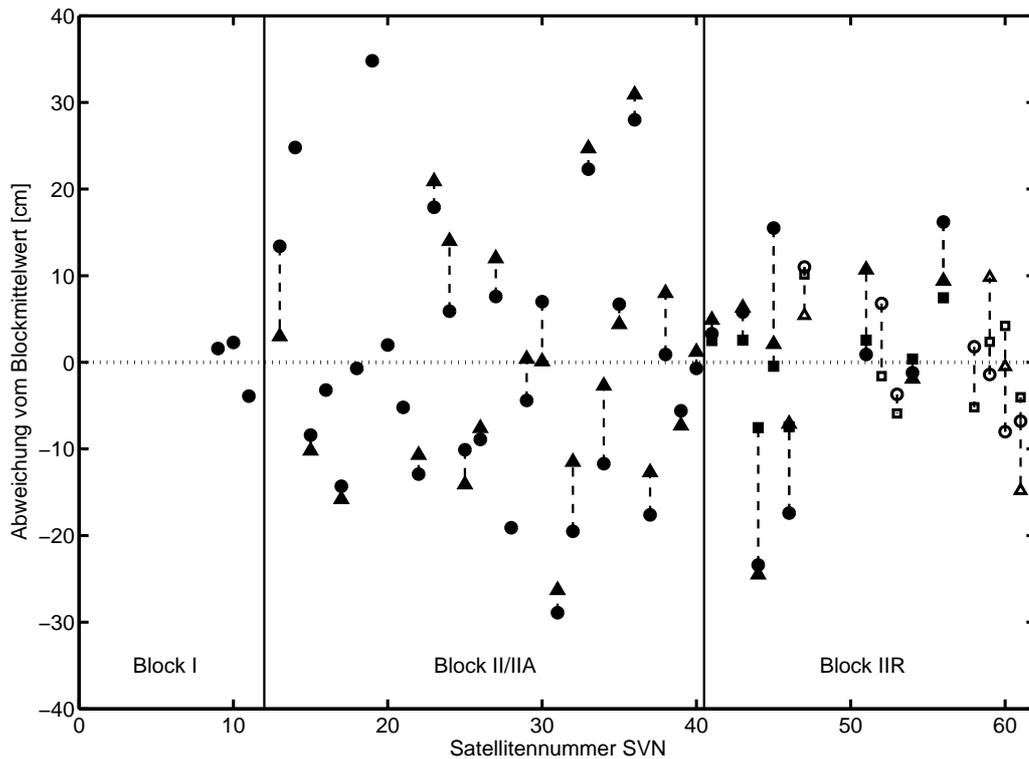


Abb. 5.25.: Abweichung [cm] des z -Offsets einzelner Satelliten vom Blockmittelwert aus Tab. 5.5: absolutes IGS-Modell (Kreise), aus azimuthalen PCVs (maximaler Nadirwinkel $z'_{\max} = 14^\circ$) des JPL abgeleitete Werte (Dreiecke), Angaben des OCS (Quadrate). Block IIR ist unterteilt in Block IIR-A (ausgefüllte Symbole) und Block IIR-B/M (nicht ausgefüllt).

in Abb. 5.23 darüber hinaus relativ konsistent zu sein. Insbesondere die Offset-Differenz zwischen Block II/IIA und Block IIR-A stimmt für die meisten Modelle sehr gut überein. Man sollte in diesem Zusammenhang jedoch nicht vergessen, daß die Mittelwerte zum Teil aus einer unterschiedlichen Anzahl von Satelliten berechnet wurden. Abgesehen vom Unterschied zwischen Block IIR-A und Block IIR-B/M, der vom relativen IGS-Modell ignoriert wird, scheinen auch das derzeitige absolute IGS-Modell und das vorher verwendete relative Modell weitgehend konsistent zu sein. Der Umstand, daß auch unter Verwendung des relativen IGS-Modells ein globaler Maßstab realisiert werden konnte, der sich nicht allzu stark vom ITRF-Maßstab unterschied, scheint mit einer zufälligerweise glücklichen Wahl der Referenzantenne AOAD/M_T zusammenzuhängen (Schmid und Rothacher, 2003).

Interessant ist natürlich auch der Vergleich der satellitenspezifischen Offsets aus Tab. 5.5. Hier interessieren jedoch weniger die absoluten Werte, als vielmehr, in welchem Verhältnis die individuellen z -Offsets zueinander stehen. Individuelle Werte liegen momentan vom OCS, von GFZ/TUM (absolutes IGS-Modell) sowie vom JPL vor. Für Block I jedoch nur von GFZ/TUM, und für Block II/IIA nur von GFZ/TUM und vom JPL. Abb. 5.25 zeigt die Abweichung der einzelnen z -Offsets vom Mittelwert des jeweiligen Satellitenblocks. Hierzu wurde von jedem einzelnen Offset-Wert der entsprechende Blockmittelwert aus Tab. 5.5 subtrahiert. Zunächst fällt auf, daß die maximal auftretenden Offset-Differenzen zwischen baugleichen Satelliten von Block zu Block kleiner werden. Während sich Block II/IIA-Satelliten noch um bis zu 70 cm voneinander unterscheiden, treten für Block IIR-A und Block IIR-B/M nur noch Unterschiede von maximal 40 cm bzw. 20 cm auf. Dies scheint auf eine zunehmende Qualität bei der Herstellung der Satelliten hinzudeuten. Block I wurde aufgrund der wenigen Satelliten hier außer Acht gelassen.

Ein Blick auf die verschiedenen Modelle zeigt für Block II/IIA eine hervorragende Übereinstimmung der aus den azimuthalen PCVs des JPL abgeleiteten Werte mit dem absoluten IGS-Modell. Während sich die z -Offsets einzelner Satelliten wie oben bereits erwähnt um bis zu 70 cm voneinander unterscheiden, beträgt die größte Abweichung zwischen JPL und IGS, relativ zum Blockmittelwert gesehen, gerade mal 10.4 cm (SVN13). Im Mittel unterscheiden sich die beiden Modelle gar nur um 4.3 cm. Besonders erfreulich ist die gute Übereinstimmung für diejenigen Satelliten, deren z -Offsets sich am deutlichsten vom Mittelwert unterscheiden. Während für den Satelliten mit dem größten z -Offset (SVN19) nur ein IGS-Wert vorliegt, kann für den Satelliten mit dem zweitgrößten (SVN36, IGS: +28.0 cm, JPL: +30.9 cm) sowie für denjenigen mit dem kleinsten Wert (SVN31, IGS: -28.9 cm, JPL: -26.3 cm) eine erstaunliche Übereinstimmung festgestellt werden. Würde man die IGS-Offsets

auf den Mittelwert von 238.0 cm beziehen, der sich ergibt, wenn man nur die Satelliten berücksichtigt, für die auch entsprechende JPL-Werte vorliegen, so würde der Vergleich sogar noch ein wenig besser ausfallen.

Vergleicht man die Offsets der verschiedenen Modelle für die Block IIR-Satelliten, so erkennt man hier größere Diskrepanzen zwischen den Modellen, und dies, obwohl die absoluten Werte eigentlich besser mit dem Blockmittel übereinstimmen. Das IGS-Modell und die JPL-Werte unterscheiden sich im Mittel um 5.5 cm (Block IIR-A) bzw. 8.1 cm (Block IIR-B/M) voneinander. Differenzen ähnlicher Größenordnung erhält man bei den jeweiligen Vergleichen mit den OCS-Werten, wobei maximale Abweichungen von bis zu 17 cm auftreten. Diese relativ schlechte Übereinstimmung könnte zumindest zu einem kleinen Teil darauf zurückzuführen sein, daß für manche der erst in den letzten Jahren gestarteten Satelliten zum Zeitpunkt der Offset-Schätzung noch zu wenige Beobachtungsdaten vorlagen. Bei Block IIR-A stimmen die drei Modelle zumindest annähernd darin überein, daß SVN44 über den kleinsten sowie SVN56 über den größten Offsetwert verfügt. Für die Satellitenantennen der neuesten Generation (Block IIR-B/M) konnte aufgrund beschränkter Beobachtungsdaten dagegen bislang keine Einigkeit in dieser Frage erzielt werden.

Eine genauere Betrachtung der Werte für Block IIR-A zeigt, daß die vom OCS angegebenen z -Offsets einen sehr viel kleineren Wertebereich abdecken als die IGS- bzw. die JPL-Offsets. Betrachtet man nur die Abweichungen der individuellen Offsets vom Blockmittelwert und bestimmt dann durch vermittelnde Ausgleichung einen Maßstabsfaktor zwischen jeweils zwei Modellen, so erhält man beim Vergleich von OCS und IGS einen Wert von 2.37, zwischen OCS- und JPL-Offsets einen Faktor von 1.93. Beim Vergleich zwischen IGS und JPL zeigt sich dagegen kein signifikanter Skalenfaktor. Eine Erklärung für diese Maßstabsdifferenz gibt es bislang nicht, interessanterweise kommen die geschätzten Skalenfaktoren dem Umrechnungsfaktor zwischen dem englischen Längemaß „Inch“ und dem international gültigen „Zentimeter“ von 2.54 allerdings erstaunlich nahe. Daß ein solcher Fehler im Bereich des möglichen liegt, zeigte sich beim Verlust des *Mars Climate Orbiter* (NASA MCO MIB, 2000). Wie die Kalibrierungsergebnisse für die Block IIF-M-Antennen (Choi, 2002) zeigen, ist die Verwendung des *Inch* bei den GPS-Systembetreibern zumindest nicht unüblich.

Multipliziert man die Abweichungen der OCS-Offsets vom Blockmittelwert mit dem Faktor 2.54 (vgl. Abb. 5.24), so erhält man für Block IIR-A eine weitaus bessere Übereinstimmung mit dem absoluten IGS-Modell. Der Mittelwert der absoluten Differenzen von 4.6 cm liegt dabei auf dem Niveau, das beim Vergleich zwischen IGS und JPL für Block II/IIA erreicht wurde. Bei Block IIR-B/M vergrößern sich die Differenzen unter der Annahme desselben Maßstabsfaktors dagegen um mehr als den Faktor 2 (s. Abb. 5.24). Die Tatsache, daß die Werte für beide Satellitenblöcke aus derselben Quelle stammen, in der außerdem ausdrücklich eine metrische Einheit angegeben ist, lassen die These einer verwechselten Längeneinheit wiederum eher unwahrscheinlich erscheinen.

Einen Vergleich nadirabhängiger PCVs zeigt Abb. 5.26. Richtungsabhängige Korrekturwerte für die Satellitenantennen wurden bislang von vier verschiedenen Institutionen ermittelt: Die Werte von GFZ und TUM sind wiederum gemittelt als „absolutes IGS-Modell“ dargestellt, daneben zeigt Abb. 5.26 Resultate von JPL und CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*). Um rein nadirabhängige Korrekturwerte zu erhalten, wurden die satellitenspezifischen azimutalen *PCV maps* des JPL zunächst in Azimutrichtung gemittelt, um dann den PCO-Einfluß eliminieren und schließlich ein Mittel je Satellitenblock berechnen zu können. Dabei kamen zwei verschiedene maximale Nadirwinkel z'_{\max} zum Einsatz. Der Wert von 14° dient dem Vergleich mit den anderen Modellen, die auf Beobachtungen auf der Erdoberfläche beruhen, wo kaum Satelliten oberhalb von 14° beobachtet werden können. Im Gegensatz dazu zeigen die PCV-Kurven unter Verwendung von $z'_{\max} = 16^\circ$ an, wie sich eine Verwendung von LEO-Daten auswirkt. Die CODE-Werte entstanden im Zuge der Bestimmung von GLONASS-Korrekturwerten aus einem Datensatz von etwa einem Jahr unter Verwendung derselben Software wie an der TUM. Hierauf wird im folgenden noch genauer eingegangen.

Alle PCV-Kurven in Abb. 5.26 sind vollständig vom Einfluß eines verbesserungsfähigen PCOs befreit. Die PCVs der Antennen an Bord der Block IIR-B/M-Satelliten nehmen mit ca. ± 15 mm den größten Wertebereich ein, Block IIR-A erreicht immerhin noch Werte von ± 8 mm, wohingegen die PCVs der älteren Satellitenblöcke beinahe vernachlässigbar erscheinen. Die Resultate von GFZ und TUM, die sich jeweils auf Daten von mehr als 10 Jahren stützen, stimmen hervorragend überein, was man an den teilweise winzigen Fehlerbalken der durchgezogenen Linien erkennen kann. Die mittleren Differenzen betragen lediglich 0.6 mm für Block I, 0.3 mm für Block II/IIA, 1.1 mm für Block IIR-A bzw. 0.2 mm für Block IIR-B/M (Schmid et al., 2007). Auch ein Vergleich des absoluten IGS-Modells mit den Werten des CODE, für deren Bestimmung weitaus weniger Beobachtungsdaten berücksichtigt wurden, fällt positiv aus. Die deutlichsten Unterschiede zeigen sich bei Block IIR-A, wo auch GFZ und TUM am schlechtesten übereinstimmen.

Etwas größere Unterschiede zeigen sich dagegen beim Vergleich mit den JPL-Resultaten. Da letztere allerdings auf einem relativ unabhängigen Ansatz beruhen, ist die Übereinstimmung des grundsätzlichen Verlaufs für die beiden Block IIR-Typen durchaus erfreulich. Die Tatsache, daß die Verwendung unterschiedlicher maximaler Nadirwinkel z'_{\max} im Falle der JPL-Werte auf unterschiedliche PCVs führt, ist kein grundsätzliches Problem,

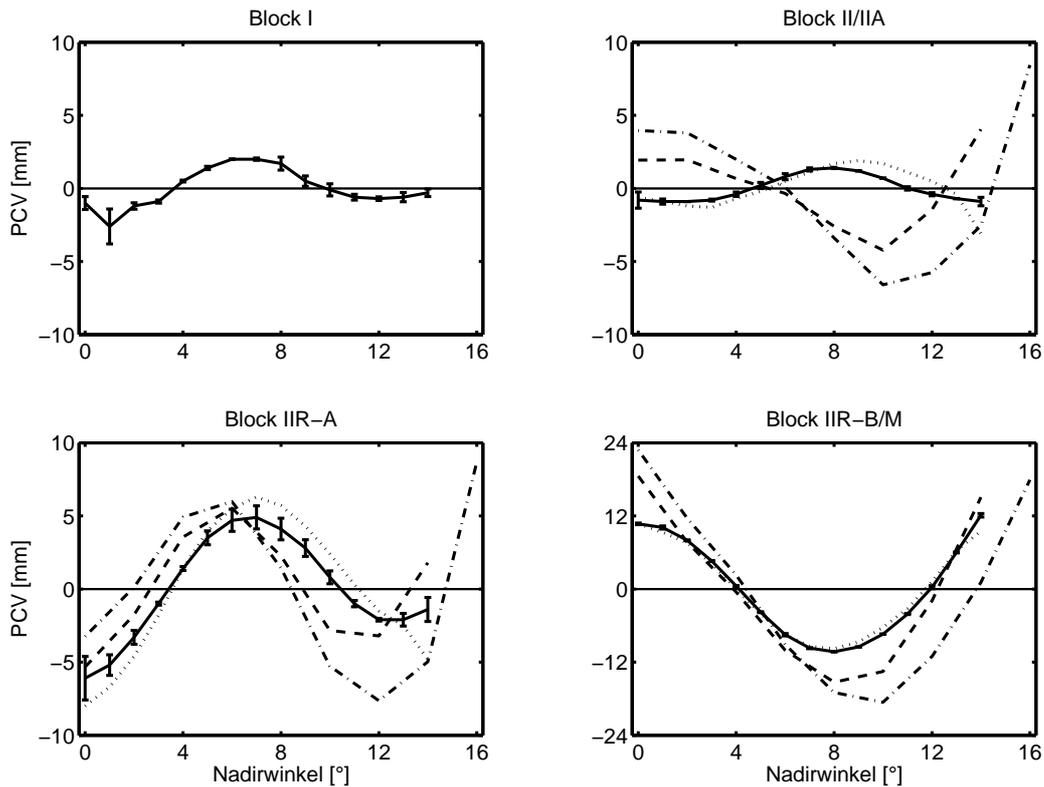


Abb. 5.26.: Blockspezifische PCVs [mm] für alle GPS-Satellitenblöcke aus verschiedenen Quellen im Vergleich: absolutes IGS-Modell (durchgezogen), JPL mit $z'_{\max} = 14^\circ$ (strichliert), JPL mit $z'_{\max} = 16^\circ$ (strichpunktirt), CODE (punktirt). Die Fehlerbalken des IGS-Modells zeigen den Unterschied zwischen GFZ- und TUM-Schätzung. Die Graphik für Block IIR-B/M ist anders skaliert als die übrigen drei Graphiken!

solange die entsprechenden konsistenten z -Offsets aus Tab. 5.5 verwendet werden. Die großen PCV-Differenzen zwischen 14° und 16° deuten allerdings auf dringenden Handlungsbedarf hin, da für diesen Bereich derzeit Werte in der offiziellen IGS-Datei fehlen. Sollen LEO-Daten verarbeitet werden, so kann für sämtliche Beobachtungen mit einem Nadirwinkel $z' > 14^\circ$ bei Verwendung des IGS-Modells momentan lediglich der Korrekturwert verwendet werden, der für $z' = 14^\circ$ gilt. Da sich die Position des Phasenzentrums für Nadirwinkel $z' > 14^\circ$ offensichtlich relativ stark verändert, sollten zur Bestimmung zukünftiger IGS-Modelle nach Möglichkeit auch LEO-Daten berücksichtigt werden.

Der einzige Ansatz, der bislang auch PCVs für L1 und L2 liefern konnte, ist die absolute Roboterkalibrierung einer Block IIA-Antenne durch die Firma Geo++ GmbH. Möchte man die Block II/IIA-Kurven aus Abb. 5.26 mit den Resultaten von Wübbena et al. (2007) vergleichen, muß man sich jedoch auf die LC-Werte beschränken. Vor einem Vergleich ist zu beachten, daß die von Wübbena et al. (2007) angegebenen Werte nicht die Vorzeichenkonvention des IGS erfüllen, die Kurven also demnach an der x -Achse gespiegelt werden müssen. Außerdem ist der PCV-Wert in Nadirrichtung zu Null gesetzt, anstatt die Summe über alle Werte zu minimieren, und schließlich reichen die Kurven von Geo++ bis zu einem Wert von 15° , während das IGS-Modell nur Nadirwinkel bis 14° umfaßt. Der Verlauf der von Wübbena et al. (2007) ermittelten LC-PCVs stimmt relativ gut mit dem absoluten IGS-Modell überein, und auch der Wertebereich von ca. ± 1 mm für Nadirwinkel bis 14° deckt sich. Aufgrund der nur schwach ausgeprägten PCVs bei Block II/IIA ist die Aussagekraft dieses Vergleiches jedoch etwas beschränkt.

Betrachtet man die Differenzen zwischen verschiedenen PCV-Modellen genauer, so läßt sich beim Vergleich aller Satellitenblöcke ein systematisches Verhalten erkennen. Die Kurven in Abb. 5.27 zeigen jeweils die Differenz der JPL- bzw. CODE-Werte gegenüber dem absoluten IGS-Modell. Diese machen deutlich, daß die PCVs des CODE im Bereich von 1–2 mm mit dem IGS-Modell übereinstimmen, während für die JPL-Werte Abweichungen von bis zu 8 mm auftreten. Das systematische Verhalten, das sich in den PCV-Differenzen aller Satellitenblöcke zeigt, kann vielerlei Ursachen haben. Eine mögliche Erklärung für die relativ großen Abweichungen der JPL-Resultate könnten Unzulänglichkeiten in der Modellierung der troposphärischen Refraktion sein, die stark mit den Antennenkorrekturen korreliert ist. Während die Troposphäre im Falle des JPL überhaupt keine Rolle spielt, da Beobachtungsdaten tieffliegender Satelliten verwendet werden, die sich außerhalb der Troposphäre befinden, spielt es für die übrigen Modelle eine relativ große Rolle, welche Troposphärenparameter (Zenitverzögerungen

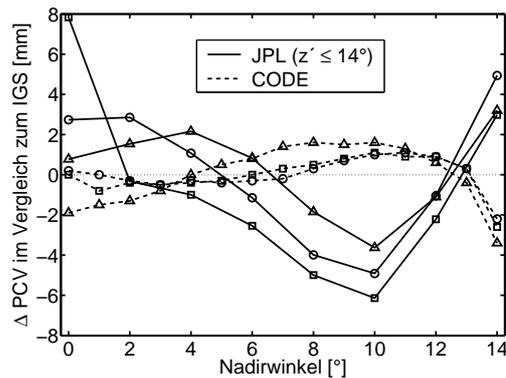


Abb. 5.27.: Abweichung [mm] der JPL- und CODE-PCVs vom absoluten IGS-Modell: Block II/IIA (Kreise), Block IIR-A (Dreiecke), Block IIR-B/M (Quadrate).

und/oder Gradienten) mit welcher Auflösung in der Ausgleichung mitgeschätzt werden und welche sog. *mapping function* zur Umrechnung der Zenitverzögerung in die jeweilige Beobachtungsrichtung verwendet wird.

In diesem Zusammenhang spielt es auch eine Rolle, bis zu welcher minimalen Elevation (*elevation cut-off*) Daten vom Empfänger aufgezeichnet werden, und ob bei der Ausgleichung Beobachtungen ihrer Elevation entsprechend mit einem Gewicht versehen werden. Aufgrund der in Kap. 5.2.3 beschriebenen Korrelation hängen die PCVs der Satellitenantennen auch stark von den Korrekturwerten für die Empfangsantennen ab. Während die IGS- und CODE-Werte auf Korrekturen beruhen, die durch spezielle Kalibrierungsmessungen gewonnen wurden (vgl. Kap. 5.1.3), verwendete das JPL das gesamte Beobachtungsdatenmaterial, um Korrekturen für die Empfangsantennen an Bord der LEOs zu gewinnen (vgl. Kap. 5.1.6). Verwendet man terrestrische Kalibrierungswerte, so kommt es beispielsweise noch darauf an, ob Radome berücksichtigt werden, und wie mit Empfangsantennen verfahren wird, für die unterhalb von 10° Elevation keine PCVs vorliegen.

Schätzung von GLONASS-Korrekturen aus globalen Beobachtungen durch CODE

Um das absolute IGS-Modell um Phasenzentrumskorrekturen für die GLONASS-Satelliten ergänzen zu können, wurden am CODE, das am Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) beheimatet ist, Daten über einen Zeitraum von ca. einem Jahr neu verarbeitet. Hierfür wurde mit der *Bernese GPS Software* (Dach et al., 2007) dasselbe Softwarepaket eingesetzt wie an der TUM. In einem ersten Durchlauf wurden auch Korrekturwerte für die GPS-Satelliten geschätzt, um die Konsistenz mit dem vorhandenen Modell überprüfen zu können. Die Blockmittelwerte für die GPS-Satelliten unterschieden sich nur um wenige cm von den in Tab. 5.5 bzw. Abb. 5.23 für das absolute IGS-Modell angegebenen Werten, und auch das Verhältnis der z -Offsets einzelner Satelliten zueinander (vgl. Abb. 5.25) konnte eindeutig bestätigt werden. Während die GPS-Offsetwerte aus Platzgründen nicht in die vorliegende Arbeit aufgenommen werden konnten, sind die zugehörigen PCVs in Abb. 5.26 dargestellt. Auch diese zeigen eine hervorragende Übereinstimmung mit dem IGS-Modell, das aus den Resultaten von GFZ und TUM gemittelt wurde. Trotz Verwendung desselben Softwarepaketes durch CODE und TUM zeigen sich jedoch systematische Differenzen in den PCVs (vgl. Abb. 5.27), die auf unterschiedliche Auswertestrategien oder aber auf die Mittelung mit den GFZ-Resultaten zurückzuführen sein dürften. Da für die CODE-Resultate nur ein Bruchteil des Datenmaterials verarbeitet werden konnte, auf dem das absolute IGS-Modell beruht, und damit auch nicht für alle GPS-Satelliten die notwendigen Korrekturwerte zur Verfügung standen, wurden die GPS-Resultate des CODE nicht für das IGS-Modell berücksichtigt.

Aus diesem Grund wurde bei einer erneuten Verarbeitung der Beobachtungsdaten aus inzwischen knapp einhalb Jahren das IGS-Modell für die GPS-Satelliten festgehalten, um möglichst konsistente GLONASS-Korrekturen zu erhalten. Da Empfängerantennen-Kalibrierungen für die GLONASS-Frequenzen (Wübbena et al., 2008) bislang nicht verfügbar sind, wurden auf Empfängerseite die Korrekturen für die benachbarten GPS-Frequenzen angebracht. Im untersuchten Zeitraum waren 17 verschiedene Satelliten aktiv, vier davon Vertreter des neuesten Satellitenblocks GLONASS-M, dazu 13 Satelliten vom Typ GLONASS (s. Tab. 5.7). Anhand der PCVs konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen beiden Satellitentypen festgestellt werden. Dies könnte darauf hindeuten, daß hinsichtlich des Antennendesigns keine großen Unterschiede zwischen den beiden Typen bestehen. In jedem Fall wurde letztlich nur ein Satz von PCV-Werten aus den Beobachtungen zu allen GLONASS-Satelliten ermittelt (s. Tab. 5.6). Vergleicht man die GLONASS-PCVs mit den GPS-PCVs aus Abb. 5.26, so kann man leicht erkennen, daß die Position des Phasenzentrums bei den GLONASS-Satelliten deutlich weniger von der

Tab. 5.6.: PCVs [mm] des CODE für GLONASS- sowie GLONASS-M-Satelliten (Stand: igs05_1402.atx).

Nadirwinkel [°]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PCV [mm]	2.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-0.8	-0.5	-0.2	-0.3	-0.2
Nadirwinkel [°]	10	11	12	13	14					
PCV [mm]	-0.2	0.1	-0.1	-0.1	0.7					

Tab. 5.7.: z -Offsets [cm] des CODE für die GLONASS-Satelliten (Stand: igs05_1402.atx). Mit der GLONASS-Nummer lassen sich die Satelliten eindeutig identifizieren, der „slot“ kennzeichnet die jeweilige Position innerhalb der dreibahnigen Satellitenkonstellation.

GLONASS no.	Slot no.	Block	Δz [cm]
711	05	GLONASS	191.41
783	18	GLONASS	192.74
787	17	GLONASS	205.59
788	24	GLONASS	207.38
789	03	GLONASS	200.46
791	22	GLONASS	200.09
792	21	GLONASS	197.54
793	20/23	GLONASS	200.22
794	02	GLONASS	195.77
795	04	GLONASS	200.61
796	01	GLONASS	194.44
797	08	GLONASS	185.34
798	19	GLONASS	203.90
701	06	GLONASS-M	219.47
712	07	GLONASS-M	232.32
713	24	GLONASS-M	232.53
714	23	GLONASS-M	227.72

Abstrahlrichtung des Signals abhängt als bei den GPS-Satelliten. Abgesehen von der Nadirrichtung, in der die Position des Phasenzentrums aufgrund der Beobachtungsverteilung ohnehin schlecht bestimmt ist (vgl. Abb. 5.21), liegen die PCVs immer unterhalb von 1 mm. Über die Ursachen hierfür läßt sich aufgrund mangelnder Informationen über das Antennendesign nur spekulieren, mögliche Erklärungen könnten aber eine konzentriertere Anordnung der Antennenelemente oder eine weniger gerichtete Abstrahlung des Signals, verbunden mit einer höheren Sendeleistung, sein.

Im letzten Verarbeitungsschritt wurden schließlich auch die GLONASS-PCVs fixiert, und nur noch PCOs geschätzt. Die in Tab. 5.7 angegebenen Resultate gelten, genau wie die GPS-Offsets des absoluten IGS-Modells, für die Epoche 2000.0. Ein Vergleich mit Abb. 5.25 macht deutlich, daß innerhalb eines GLONASS-Satellitenblocks weitaus geringere Variationen des z -Offsets auftreten als dies bei den GPS-Satelliten der Fall ist. Während sich die z -Offsets der Block II/IIA-Satelliten um bis zu 70 cm voneinander unterscheiden, zeigen die GLONASS-Satelliten untereinander eine Übereinstimmung von besser als 25 cm (GLONASS) bzw. 15 cm (GLONASS-M). Sollte das GLONASS-Signal nicht wie das GPS-Signal aus einzelnen Teilsignalen bestehen, die phasenverschoben ausgesandt werden (vgl. Kap. 5.2.1), könnte dies eine mögliche Erklärung hierfür sein. Sehr erfreulich ist außerdem die gute Übereinstimmung der Blockmittelwerte von 198.1 cm bzw. 228.0 cm mit den von den GLONASS-Betreibern angegebenen nominellen Werten von 162.0 cm bzw. 218.3 cm (Schaer, 2005). Im Falle von GPS stimmen die Werte des absoluten IGS-Modells deutlich schlechter mit denjenigen des OCS überein (vgl. Tab. 5.5 und Abb. 5.23).

Vergleich azimuthaler PCVs

Laut Czopek und Shollenberger (1993) kann die Sendeleistung der Satellitenantennen nicht in allen Azimutalrichtungen gleich groß sein, da der innere Ring, der mit 90% der Leistung gespeist wird, nur aus vier einzelnen Antennenelementen besteht (vgl. Kap. 5.2.1). Da die Abstrahlung in Richtung der Elemente des inneren Rings

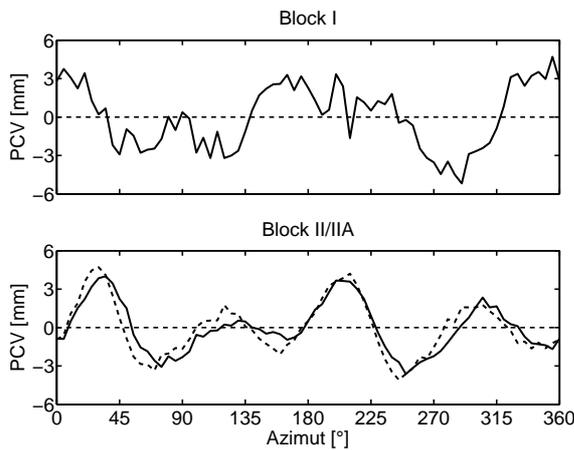


Abb. 5.28.: Mittlere azimutale LC PCVs [mm] für Block I und II/IIA bei einem Nadirwinkel von $z' = 14^\circ$ und einer Auflösung von 5° (durchgezogene Linien: TUM, strichliert: JPL).

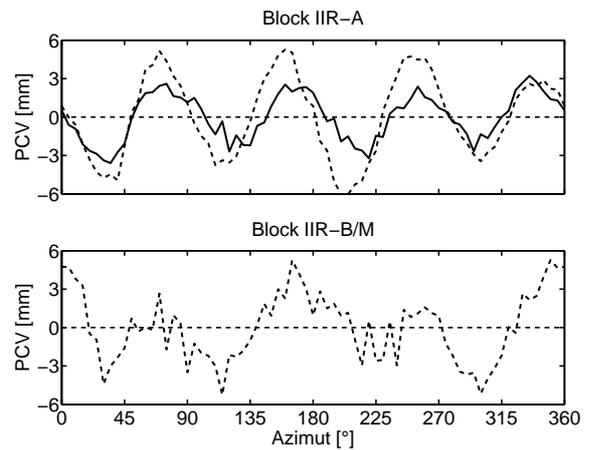


Abb. 5.29.: Mittlere azimutale LC PCVs [mm] für Block IIR-A und IIR-B/M bei einem Nadirwinkel von $z' = 14^\circ$ und einer Auflösung von 5° (durchgezogene Linien: TUM, strichliert: JPL).

erwartungsgemäß am stärksten ist, wäre es wichtig, deren Lage im Satellitenkoordinatensystem zu kennen. Diese Information ist jedoch nicht für alle Satellitentypen verfügbar (vgl. Kap. 5.2.1). Der äußere Ring mit seinen acht Antennenelementen verursacht aufgrund „höherer Symmetrie“ keine nennenswerten azimutalen PCVs (Czopek und Shollenberger, 1993).

Schmid et al. (2005b) schätzten mit Hilfe der *Bernese GPS Software* (Hugentobler et al., 2001) azimutale PCVs für die GPS-Satellitenantennen aus Beobachtungsdaten des globalen IGS-Netzes. Genau wie bei den nadirabhängigen PCVs erfolgte die Schätzung zeitgleich mit der Bestimmung von Troposphären-, Bahn- und Erdrotationsparametern, für die Empfangsantennen wurden wiederum absolute Roboterkalibrierungen der Firma Geo++ GmbH eingeführt (vgl. Kap. 5.1.3). Da Teile der Antennen an einzelnen Tagen u.U. nur spärlich mit Beobachtungen besetzt sind (vgl. Abb. 5.22), wurde die Auflösung in Nadirrichtung gegenüber der nadirabhängigen PCV-Schätzung deutlich reduziert, um Singularitäten zu vermeiden. Statt der üblichen Auflösung von 1° wurde die Zahl der Parameter in Nadirrichtung durch eine Auflösung von 14° (Abb. 5.28 und 5.29) bzw. 5° (Abb. 5.30 und 5.31) reduziert, um der Zunahme der Parameteranzahl in Azimutrichtung (Auflösungen von 5° bzw. 10°) entgegenzuwirken.

Untersucht wurden zwei möglichst weit auseinanderliegende Zeiträume: sieben aufeinanderfolgende Tage im Jahre 1994 (1.–7. Januar) sowie sechs Tage im Jahre 2002 (14.–19. Juli). Der erste Zeitraum erlaubte eine Schätzung für die Block I-Satelliten, während des zweiten war bereits eine relativ große Zahl von Block IIR-A-Satelliten im Orbit, und anhand von Block II/IIA konnte schließlich noch eine Aussage zur Langzeitstabilität der geschätzten Parameter getroffen werden. Da die Schätzungen für einzelne Satelliten sehr gut übereinstimmten (Schmid et al., 2005b), konnte man sich auch hier auf blockspezifische Korrekturen beschränken, was die Zahl der zu schätzenden Parameter nochmals reduzierte. Von jeder Eintageslösung wurde darüber hinaus der Mittelwert abgezogen sowie der störende Einfluß des PCOs in der xy -Ebene nach den Gleichungen (5.19) bzw. (5.20) entfernt. Die Resultate sind in den Abb. 5.28 und 5.29 unter der Bezeichnung „TUM“ dargestellt, im Falle von Block II/IIA der Mittelwert aus den Schätzungen von 1994 und 2002, die nahezu perfekt übereinstimmten (Schmid et al., 2005b).

Wie oben bereits erwähnt, enthalten die aus LEO-Daten abgeleiteten PCV-Werte des JPL (Haines et al., 2004) auch azimutale Korrekturen. Während die zenitale Auflösung, bei einem maximalen Nadirwinkel von $z'_{\max} = 16^\circ$, 2° beträgt, sind die satellitenspezifischen Korrekturen in azimutaler Richtung in 5° -Schritten gegeben. Um die JPL-Werte mit den TUM-Schätzungen vergleichen zu können, mußten zunächst die azimutalen PCVs jedes einzelnen Satelliten für einen bestimmten Nadirwinkel herausgegriffen werden. Nach einer Mittelung über alle Satelliten eines Blocks konnte ein Mittelwert abgezogen sowie der PCO-Einfluß auf die xy -Ebene nach den Gleichungen (5.19) bzw. (5.20) eliminiert werden. Schließlich mußten zu den Azimutwinkeln jeweils noch 90° hinzuaddiert werden, da das Azimut von Haines et al. (2004) offensichtlich von der x -Achse an gezählt wird und nicht, wie in Kap. 5.2.2 beschrieben, von der y -Achse an.

Vergleicht man die azimutalen PCVs der verschiedenen Satellitenblöcke bei einem Nadirwinkel von 14° (Abb. 5.28 und 5.29), so können mit Amplituden von 4–5 mm für alle Antennentypen Korrekturen ähnlicher Größenordnung festgestellt werden. Das laut Czopek und Shollenberger (1993) zu erwartende vierfache Muster in den PCV-Kurven zeigt sich am deutlichsten in den Resultaten für Block II/IIA und Block IIR-A. Während bei Block IIR-A, zumindest in der TUM-Lösung, alle Maxima gleich groß sind, offenbart Block II/IIA eine gewisse Asymmetrie, was darauf hindeuten könnte, daß nicht alle vier Antennenelemente mit der gleichen Leistung gespeist werden. Die

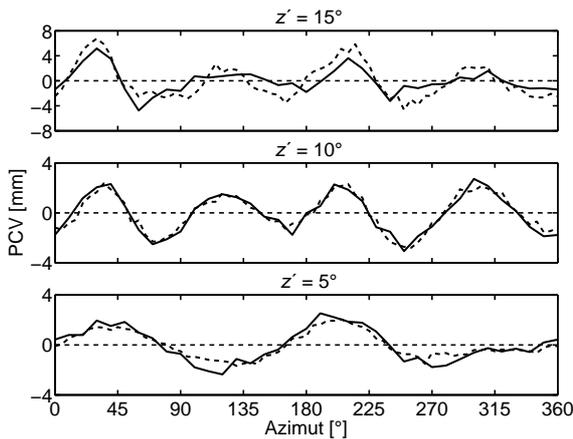


Abb. 5.30.: Mittlere azimuthale LC PCVs [mm] für Block II/IIA bei einer Auflösung von 5° in Nadirrichtung und 10° (TUM, durchgezogen) bzw. 5° (JPL, strichliert) in Azimutrichtung.

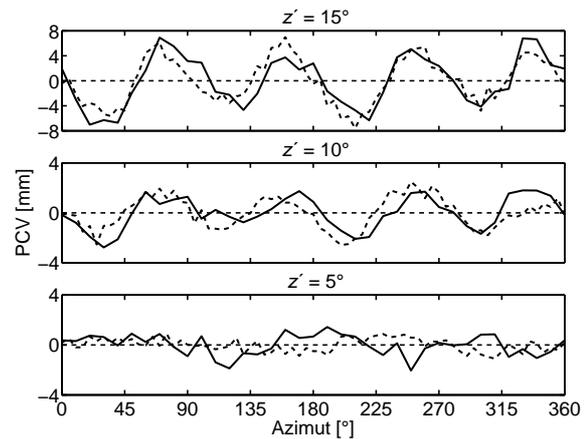


Abb. 5.31.: Mittlere azimuthale LC PCVs [mm] für Block IIR-A bei einer Auflösung von 5° in Nadirrichtung und 10° (TUM, durchgezogen) bzw. 5° (JPL, strichliert) in Azimutrichtung.

PCV-Kurven für Block I und Block IIR-B/M, für die jeweils nur eine Schätzung vorliegt, zeigen ein deutlich höheres Rauschen. In beiden Fällen liegt dies hauptsächlich daran, daß im Untersuchungszeitraum nur relativ wenige Satelliten des jeweiligen Typs beobachtet werden konnten. Bei Block I kommt die unbefriedigende Verteilung globaler GPS-Stationen im Jahre 1994 noch erschwerend hinzu. Beide Antennentypen zeigen interessanterweise ein ähnliches Verhalten, hinter dem sich eine Asymmetrie wie bei Block II/IIA vermuten läßt.

Verschiebt man, wie oben beschrieben, die JPL-Werte um 90° in Azimutrichtung, so stimmen die Werte für Block II/IIA nahezu perfekt mit der TUM-Schätzung überein (s. Abb. 5.28). Dies ist umso erfreulicher, als von den beiden Institutionen unterschiedliche Ansätze verfolgt wurden. Während sich die TUM-Resultate auf die Beobachtungen terrestrischer GPS-Stationen stützen, basieren die JPL-Werte auf den Messungen der GPS-Antennen an Bord tieffliegender Satelliten. Im Falle von Block IIR-A stimmen die azimuthalen PCVs von JPL und TUM zwar der Phase nach überein, die Amplituden zeigen dagegen deutliche Unterschiede (Abb. 5.29). Dies ist dadurch zu erklären, daß die JPL-Werte mit einer Auflösung von 2° in Nadirrichtung geschätzt wurden, während für die TUM-Werte in den Abb. 5.28 und 5.29 eine Auflösung von 14° gewählt wurde. Da unterhalb eines Nadirwinkels von etwa 5° bei Block IIR-A keine nennenswerten azimuthalen PCVs auftreten (vgl. Abb. 5.31), erhält man für $z' = 14^\circ$ einen zu kleinen Wert, wenn zwischen 0° und 14° keine weitere Stützstelle liegt.

Nach einer Erhöhung der TUM-Auflösung in Nadirrichtung auf 5° stimmen auch bei Block IIR-A die Amplituden zwischen JPL und TUM sehr gut überein. Für die Abb. 5.30 und 5.31 wurden die JPL-Werte für $z' = 5^\circ$ sowie $z' = 15^\circ$ zwischen den benachbarten geradzahigen Nadirwinkeln interpoliert. Für die TUM-Kurven wurde darüber hinaus die Auflösung in Azimutrichtung auf 10° reduziert. Trotz dieser Unzulänglichkeiten stimmen JPL und TUM auch für kleinere Nadirwinkel hervorragend überein, obwohl die Amplituden hier sehr viel kleiner sind. Während die Asymmetrie von Block II/IIA bei einem Nadirwinkel von 10° zu verschwinden scheint, zeigen beide Lösungen (TUM, JPL) für $z' = 5^\circ$ nur noch zwei Maxima (Abb. 5.30). Bei Block IIR-A treten bei einem Nadirwinkel von 5° offenbar keine signifikanten azimuthalen PCVs auf (Abb. 5.31; vgl. auch Abb. 5.33). Die dargestellten Werte zeigen damit wohl das ungefähre Genauigkeitsniveau der azimuthalen PCV-Schätzung. Hinzugefügt werden sollte noch, daß der Einfachheit halber für jeden Nadirwinkel jeweils eine separate horizontale Offsetkorrektur zugelassen wurde.

In den Abb. 5.32 und 5.33 sind die azimuthalen PCVs des JPL schließlich noch flächenhaft für Block II/IIA bzw. Block IIR-A dargestellt, wobei die Azimutdefinition des JPL (offenbar ab der x -Achse gezählt) beibehalten wurde. Nachdem die für jeden einzelnen Satelliten gegebenen *PCV maps* von den rein nadirabhängigen Anteilen befreit wurden, tritt bei einer Mittelung über alle Satelliten eines Blocks das vierfache Muster deutlich zutage. Die Unterschiede gegenüber den Abb. 5.28 bis 5.31 erklären sich dadurch, daß keine Korrektur des horizontalen Offsets angebracht wurde. Insbesondere zeigt sich dies in Abb. 5.32, wo gegenüberliegende Maxima unterschiedlich stark ausgeprägt sind (vgl. Abb. 5.15).

Flächenhafte PCVs liegen auch für die durch die Firma Geo++ GmbH kalibrierte Block IIA-Antenne vor (Wübena et al., 2007). Interessant an diesen Resultaten ist, daß die L1-PCVs in azimuthaler Richtung zwei Maxima aufweisen, während es im Falle der Frequenz L2 derer vier sind. Die ionosphärenfreie Linearkombination LC wird hingegen von L1 dominiert und zeigt nur zwei Maxima, was sich nicht ganz mit den Block II/IIA-Werten

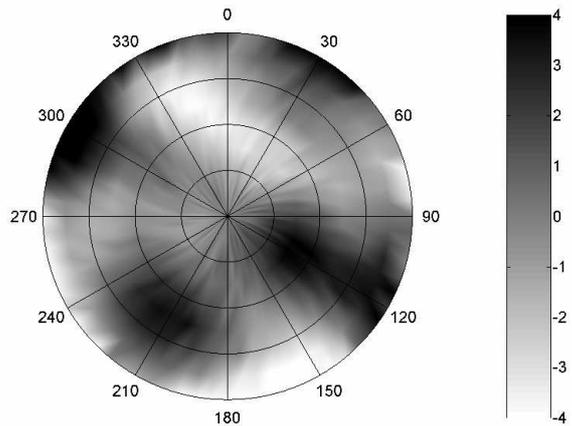


Abb. 5.32.: Mittlere azimuthale LC PCVs [mm] des JPL für die Block II/IIA-Antennen bis $z'_{\max} = 16^\circ$ (Azimutdefinition des JPL; Haines et al., 2004, 2005).

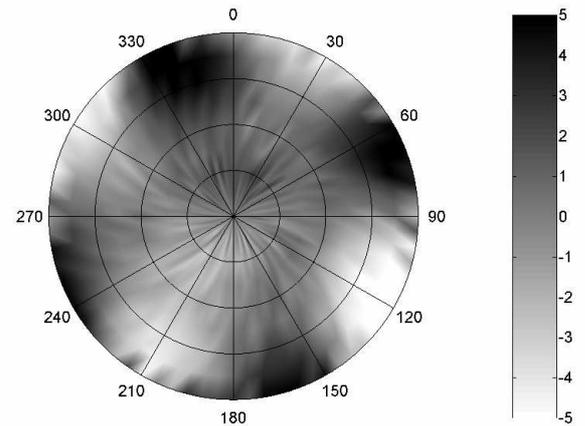


Abb. 5.33.: Mittlere azimuthale LC PCVs [mm] des JPL für die Block IIR-A-Antennen bis $z'_{\max} = 16^\circ$ (Azimutdefinition des JPL; Haines et al., 2004, 2005).

in Abb. 5.28 deckt. Am schlechtesten ist die Übereinstimmung jedoch im Hinblick auf die Größenordnung der azimuthalen PCVs. Während die Schätzungen von TUM und JPL in Abb. 5.28 nahezu mm-genau übereinstimmen und dabei einen Wertebereich von ± 4 mm abdecken, stellten Wübbena et al. (2007) azimuthale Variationen von ca. ± 20 mm fest. Dabei ist jedoch zu beachten, daß diese Extremwerte bei einem Nadirwinkel von 15° erreicht werden, während die Werte aus Abb. 5.28 für einen Nadirwinkel von 14° gelten.

5.2.6. Bestimmung der GNSS-Phasenzentren durch andere geodätische Raumverfahren

Da zwei der GPS-Satelliten (SVN35, SVN36) sowie alle GLONASS-Satelliten Retroreflektoren tragen, sind auch Laserabstandsmessungen (*satellite laser ranging*) zu diesen Satelliten möglich. Dadurch erhält man jedoch nur Zugang zur Position des Laserreflektors an Bord des Satelliten, nicht jedoch zum Phasenzentrum der Mikrowellenantenne. Vergleiche von GNSS-Bahnen, die sich auf das Massenzentrum des Satelliten beziehen, mit SLR-Messungen, offenbarten jeweils eine Diskrepanz in radialer Richtung von ca. 5 cm für die GPS- sowie 2 cm für die GLONASS-Satelliten (Appleby und Otsubo, 2004; Urschl et al., 2005, 2007). Da an den GNSS-Messungen die Korrekturen für das Antennenphasenzentrum sowie an den SLR-Messungen der Reflektor-Offset angebracht werden müssen, um jeweils den Bezug zum Massenzentrum des Satelliten herzustellen, wurde gemutmaßt, daß mögliche Fehler in einer dieser beiden Korrekturen für den Versatz zwischen den beiden unabhängigen geodätischen Raumverfahren verantwortlich sein könnten. Obwohl sich die satellitenspezifischen Offsets von SVN35 und SVN36 um ca. 20 cm voneinander unterscheiden (vgl. Tab. 5.5), zeigt sich laut Urschl et al. (2005, 2008) trotz Verwendung eines Blockmittelwertes jedoch für beide Satelliten nahezu derselbe systematische Fehler. Dies läßt sich dadurch erklären, daß die ungünstige Wahl eines z -Offsets zum Großteil durch die Uhrenschätzung kompensiert wird. Auch die Einführung der PCVs für die Satellitenantennen sorgt nicht für die notwendige Skalierung der GNSS-Bahnen (Schmid und Rothacher, 2003). Und wie bereits erwähnt, ist neben einer Konsistenzprüfung kein Beitrag zur Bestimmung der GNSS-Phasenzentren von SLR-Seite möglich.

Im Jahr 2000 wurde eine gemeinsame Arbeitsgruppe von IVS, IGS und ILRS eingerichtet, um die Möglichkeit zu untersuchen, die von den GPS-Satelliten im L-Band ausgesandten Signale mit VLBI-Teleskopen aufzuzeichnen, um dadurch Informationen über die Position des Phasenzentrums zu gewinnen (Corey et al., 2002). Unter der Annahme, daß sich Abweichungen von der Sollphase auf das Phasenzentrum auswirken, war angedacht, die Phasenlage jedes einzelnen Antennenelements zu ermitteln, und zwar durch differentielle VLBI-Messungen zwischen dem GPS-Satelliten und richtungsmäßig benachbarten Quasaren. Die Wahl solcher Referenzquellen wäre jedoch schwierig gewesen, da sich die GPS-Satelliten bei langen Basislinien für die zwei beteiligten Teleskope in verschiedenen Raumrichtungen befinden. Daneben kennt man die exakte Position der Quasare nur für Frequenzen im S- bzw. X-Band, nicht jedoch für solche im L-Band. Da die Arbeitsgruppe abschließend zu dem Ergebnis kam, daß mit einer zu erwartenden Auflösung von ca. 50 cm nicht zwischen den einzelnen Wendelantennen unterschieden werden könnte, wurde der Ansatz bislang nicht weiterverfolgt (Corey et al., 2002).

Tab. 5.8.: Versatz [ppb] und Änderungsrate [ppb/a] des terrestrischen Maßstabs im Vergleich zu IGB00 (Ferland, 2003) für verschiedene globale GPS-Lösungen am 1. Januar 2000 (b: blockspezifisch, s: satellitenspezifisch, e: nur elevationsabhängig, a: elevations- und azimutabhängig; Schmid et al., 2007).

Lösung	Antennenmodell	Sendeantennen		Empfangsantennen		Offset [ppb] im Vergleich zu IGB00	Drift [ppb/a]
		PCVs	PCOs (Δz)	PCVs	Radome		
A	IGS (relativ)	–	b	e	–	1.20	0.34
B	TUM (absolut)	b	b	a	–	–0.65	0.18
C	TUM (absolut)	b	s	a	–	–0.10	0.12
D	IGS (absolut)	b	s	a	x	0.25	0.15

5.3. Positive Wirkung auf globale GNSS-Parameter

Da mit dem Umstieg von relativen auf absolute Korrekturwerte für das Phasenzentrum der Empfangsantennen (vgl. Kap. 5.1.3) sowie mit der verfeinerten Modellierung des Phasenzentrums der Sendeantennen (vgl. Kap. 5.2.5) systematische Fehlereinflüsse behoben werden konnten, sollte sich dieser Schritt positiv auf einige andere Zielgrößen globaler GNSS-Auswertungen auswirken. Insbesondere für stark mit der Phasenzentrumsposition korrelierte Parameter wie Troposphäre und Stationshöhe sollte sich eine Verbesserung einstellen. Direkt mit den Stationshöhen hängt darüber hinaus der globale terrestrische Maßstab zusammen, dessen Verzerrung die Einführung absoluter Korrekturen ursprünglich verhindert hatte (Beutler, 1996). Zur Untersuchung möglicher Auswirkungen auf andere GNSS-Parameter wurden im Rahmen des GPS-Reprozessierungsprojektes der TU Dresden (TUD) und der TUM (Steigenberger et al., 2006) u.a. verschiedene langjährige Zeitreihen erzeugt, die sich lediglich im Hinblick auf das verwendete Phasenzentrumsmodell unterscheiden.

5.3.1. Globaler terrestrischer Maßstab und Punktkoordinaten

Aufgrund der in Kap. 5.2.4 erläuterten Korrelation zwischen dem globalen terrestrischen Maßstab und dem PCO der Satellitenantennen in z -Richtung änderte sich der Maßstab bei Verwendung blockspezifischer PCOs mit dem Start jedes neuen Satelliten, wenn dessen individueller PCO nicht mit dem Blockmittelwert übereinstimmte (Ge et al., 2005). Außerdem zeigte die IGS-Lösung bei Verwendung des relativen PCO-Modells (vgl. Tab. 5.5) einen Maßstabsversatz gegenüber dem ITRF2000 (Altamimi et al., 2002). Ein solcher deutet auf eine falsche Größenordnung der PCO-Werte hin.

Um den Einfluß unterschiedlicher Korrekturmodelle für das Antennenphasenzentrum auf den terrestrischen Maßstab zu untersuchen, wurden an der TUM mit Hilfe der *Bernese GPS Software* verschiedene konsistente GPS-Lösungen für den Zeitraum vom 1. Januar 1994 bis zum 31. Dezember 2004 erzeugt (Tab. 5.8; Schmid et al., 2007). Mit Hilfe einer Helmert-Transformation läßt sich für jeden einzelnen Tag durch Vergleich aller geschätzten Stationskoordinaten mit dem Referenzrahmen IGB00 (Ferland, 2003), einer IGS-Realisierung des ITRF2000, ein Maßstabsunterschied [ppb] ermitteln. Eine ausgleichende Gerade durch alle Offsetwerte dieser 11 Jahre liefert zusätzlich eine Änderungsrate [ppb/a] des Maßstabs.

Die unter Verwendung des relativen IGS-Modells berechnete Lösung A kann den von Altamimi et al. (2002) festgestellten Maßstabsversatz gegenüber dem IGB00 bestätigen. Außerdem zeigt die Änderungsrate von 0.34 ppb/a sehr deutlich, daß die PCO-Werte in z -Richtung nicht der Realität entsprechen können. Andernfalls könnten Änderungen in der Zusammensetzung der Satellitenkonstellation keinen nennenswerten Einfluß auf den Maßstab haben. Beim Übergang auf ein vereinfachtes Absolutmodell mit blockspezifischen PCOs für die Satellitenantennen (Lösung B) verbessern sich Offset und Drift jeweils etwa um den Faktor 2. Daß der Versatz gegenüber IGB00 kleiner wird, darf jedoch nicht als Beweis für eine Verbesserung des Phasenzentrumsmodells gewertet werden, da die absoluten Korrekturen für die Satellitenantennen konsistent zum fixierten IGB00-Maßstab bestimmt wurden. Die Verringerung der Änderungsrate auf 0.18 ppb/a ist jedoch ein deutliches Indiz dafür, daß die absoluten Korrekturwerte für Sende- und Empfangsantennen realistischer sind als die relativen.

Kommen für die Satellitenantennen satellitenspezifische PCOs anstatt blockspezifischer Werte zum Einsatz (Lösung C), so kann die Realisierung des terrestrischen Maßstabs weiter stabilisiert werden. Trotz verfeinerter Modellierung und obwohl zur Bestimmung der Satellitenkorrekturen sowie zur Berechnung der globalen Lösung dieselbe Software verwendet wurde, verbleibt eine signifikante Änderungsrate von 0.12 ppb/a. Dies hängt damit zusammen, daß das IGB00 einen mittleren Fehler in den vertikalen Stationsgeschwindigkeiten von etwa 0.8 mm/a

aufweist (Ray et al., 2004). Rechnet man 0.12 ppb in eine entsprechende Stationshöhe um, so erhält man mit $0.12 \text{ ppb} \cdot R_E = 0.12 \cdot 10^{-9} \cdot 6378 \text{ km} \approx 0.77 \text{ mm}$ ziemlich genau das Fehlerbudget des Referenzrahmens.

Bei Verwendung des absoluten IGS-Modells (Lösung D) steigen Offset und Drift wieder leicht an, was daran liegt, daß hierfür die Korrekturwerte von GFZ und TUM gemittelt wurden, worunter die Konsistenz bei Auswertungen mit der TUM-Software ein wenig leidet. Im Vergleich zum relativen IGS-Modell (Lösung A) kann dennoch eine deutliche Verbesserung verzeichnet werden. Steigenberger et al. (2009) konnten darüber hinaus belegen, daß nicht nur der Maßstab des Stationsnetzes an Stabilität gewinnt, sondern auch dessen Lagerung. Dies zeigte sich in verringerten Änderungsraten für Translationen und Rotationen gegenüber dem IGB00, die sich aus einer Ähnlichkeitstransformation ergaben.

Bei der Bewertung der in Tab. 5.8 enthaltenen Zahlenwerte sollte man beachten, daß Altamimi et al. (2007) bei der Generierung des ITRF2005 für den 1. Januar 2000 eine Maßstabsdiskrepanz zwischen VLBI und SLR von 1 ppb bzw. 0.08 ppb/a feststellen konnten. Als mögliche Ursachen werden die unbefriedigende Stationsverteilung, Unsicherheiten in den Differenzvektoren zwischen den Referenzpunkten (*local ties*) an Stationen mit beiden Techniken, systematische Effekte sowie die Verwendung inkonsistenter a priori-Korrekturmodelle angeführt. Da der Maßstab des ITRF2000 sowohl auf VLBI- als auch auf SLR-Beobachtungen beruht (Altamimi et al., 2002), sind verbleibende Differenzen in Tab. 5.8 wohl keine Überraschung.

Neben eines Maßstabeffektes, der eine Aufblähung des Stationsnetzes bewirkt, können Veränderungen an den PCOs auch Stationshöhenänderungen hervorrufen, die von der geographischen Lage der betreffenden Station abhängen. Eine solche Deformierung des Stationsnetzes konnten Cardellach et al. (2007) durch verschiedene Simulationen belegen. Die Verwendung simulierter Daten erlaubt es, allein den Einfluß der PCOs der Satellitenantennen sichtbar zu machen. Vergleichbare Analysen des Einflusses des absoluten IGS-Modells auf die Stationskoordinaten von Steigenberger et al. (2009) sind dagegen schwierig zu interpretieren, da die Einflüsse der Satellitenantennen nicht von denen der Empfangsantennen einschließlich der Radome zu trennen sind. Nicht ganz korrekt ist dagegen die Feststellung, die relativen PCO-Werte des IGS für die Satellitenantennen seien um mehr als 1 m falsch gewesen. Absolute und relative Werte für die z -Offsets unterscheiden sich zwar um diesen Betrag, der jedoch zum größten Teil mit dem Unterschied zwischen relativen und absoluten Phasenzentrumskorrekturen für die Empfangsantennen zusammenhängt. Die Größenordnung der von Cardellach et al. (2007) simulierten Fehlereinflüsse darf also angezweifelt werden, was jedoch die Erkenntnisse über die räumliche Verteilung der Höhenänderungen nicht schmälert.

Unter der Annahme eines systematischen Fehlers von 1 m in den PCOs der Satellitenantennen unterscheiden sich Stationshöhenänderungen je nach Lage der Station um bis zu 1 cm voneinander. Extremal sind die Auswirkungen in mittleren Breiten, wo besonders viele Satelliten in hoher Elevation beobachtet werden können, sowie in den Polarregionen, wo überhaupt keine zenitnahen Beobachtungen möglich sind. Dies hängt damit zusammen, daß Beobachtungen nahe des Zenits einen höheren Einfluß auf die Stationshöhe haben als Beobachtungen in niedriger Elevation. Wie Cardellach et al. (2007) feststellen konnten, hängt das Ausmaß der Deformation des Stationsnetzes auch von der Elevationsschranke ab. Je weniger Beobachtungen nahe des Horizonts gemacht werden, desto stärker wird das Stationsnetz verformt. Der Einfluß auf die horizontalen Stationskoordinaten bleibt dabei jedoch gering.

Da Cardellach et al. (2007) von einem mittleren Fehler von etwa 1 m in den relativen PCO-Werten des IGS ausgehen, messen sie den PCO-Differenzen zwischen einzelnen Satelliten eines Blocks nur wenig Bedeutung bei. Tatsächlich dürfte die Berücksichtigung satellitenspezifischer Offsetwerte aber einer der Hauptvorteile des absoluten IGS-Modells sein. Zuguterletzt demonstrieren Cardellach et al. (2007) den Einfluß eines fehlerhaften PCO-Modells auf die Stationsgeschwindigkeiten. Unter der Annahme eines mittleren z -Offset-Fehlers von gut 1 m, der sich durch den Start neuer Satelliten mit der Zeit verändert, ergeben sich Fehler von bis zu 1 mm/a in den vertikalen Stationsgeschwindigkeiten.

Wie oben bereits angesprochen sind die Phasenzentrumskorrekturen stark mit Troposphären- und Uhrenparametern sowie mit den Stationshöhen korreliert. Die Dekorrelation gelingt in der Regel umso einfacher, je besser die Verteilung der einzelnen Beobachtungen auf unterschiedliche Elevationswinkel ist. Probleme in der Modellierung eines dieser Parameter äußern sich daher vor allem darin, daß GNSS-Resultate vom verwendeten minimalen Elevationswinkel abhängen (Elósegui et al., 1995; Hatanaka et al., 2001). Je geringer diese Abhängigkeit, desto besser.

Um den Einfluß des *absoluten* Phasenzentrumsmodells auf die Abhängigkeit der Stationshöhen vom minimalen Elevationswinkel zu untersuchen, wurden verschiedene Eintageslösungen verglichen. Die Abb. 5.34 und 5.35 zeigen in der unteren Hälfte jeweils, wie sich eine Anhebung der Elevationsschranke von 3° auf 10° bzw. von 10° auf 15° auf die Stationshöhen auswirkt. In der oberen Hälfte sind jeweils die Resultate für das *relative* IGS-Modell zum Vergleich dargestellt. Ideal wäre, wenn keine Höhenänderungen eintreten würden, die Elevationsschranke also keinen Einfluß auf die Koordinaten hätte.

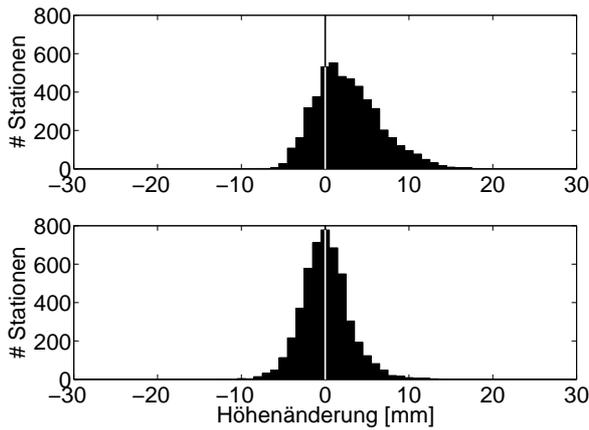


Abb. 5.34.: Histogramm der Stationshöhenänderungen innerhalb aller Eintageslösungen im Oktober 2002 infolge einer Anhebung des minimalen Elevationswinkels von 3° auf 10° . Oben: relatives IGS-Modell ($\Delta\bar{H} = +2.7 \pm 3.9$ mm), unten: absolutes IGS-Modell ($\Delta\bar{H} = +0.1 \pm 2.9$ mm). Die Zahlenwerte geben Mittelwert und Streuung an.

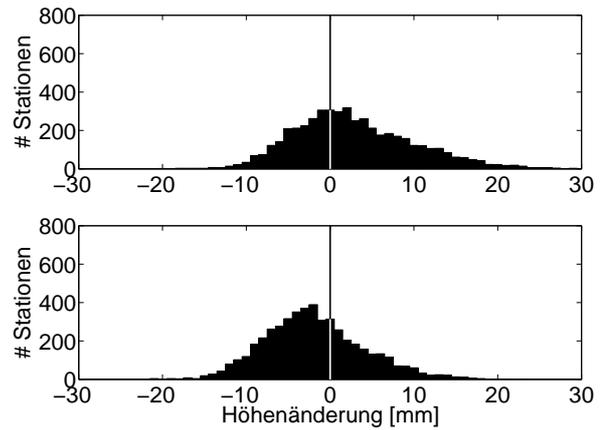


Abb. 5.35.: Histogramm der Stationshöhenänderungen innerhalb aller Eintageslösungen im Oktober 2002 infolge einer Anhebung des minimalen Elevationswinkels von 10° auf 15° . Oben: relatives IGS-Modell ($\Delta\bar{H} = +2.8 \pm 7.2$ mm), unten: absolutes IGS-Modell ($\Delta\bar{H} = -1.9 \pm 6.0$ mm). Die Zahlenwerte geben Mittelwert und Streuung an.

Am ehesten trifft dies noch für das absolute Modell beim Vergleich von 3° bzw. 10° zu (Abb. 5.34), was zum Teil daran liegen dürfte, daß Beobachtungen mit niedriger Elevation in der Ausgleichung mit einem relativ geringen Gewicht versehen werden und daher keinen großen Einfluß auf die Resultate haben. Das vergleichsweise schlechte Abschneiden des relativen Modells in Abb. 5.34 hängt wohl vor allem mit dem Fehlen von Empfängerantennenkorrekturen in diesem Elevationsbereich zusammen (vgl. Kap. 5.1.4). Vergleicht man Elevationswinkel von 10° und 15° (Abb. 5.35), so fällt der Unterschied zwischen relativem und absolutem Modell weniger deutlich aus, wenn auch die Streuung um etwa 1 mm abnimmt. Der Mittelwert wird zwar etwas kleiner, bleibt allerdings deutlich von Null verschieden. Falls Beobachtungen unterhalb von 10° Elevation verarbeitet werden sollen, ist das absolute Modell in jedem Fall vorzuziehen.

Unterschiede in den Auswertestrategien der verschiedenen IGS-Analysezentren, insbesondere die Verwendung unterschiedlicher Elevationsschranken sowie unterschiedlicher elevationsabhängiger Gewichtungsfunktionen, haben zur Folge, daß sich die Lösungen der einzelnen Institutionen im Maßstab ihrer jeweiligen Stationsnetze unterscheiden (Altamimi et al., 2002; Ferland et al., 2005). Permanent überwacht werden der Maßstab und weitere Parameter durch die *IGS Reference Frame Working Group* unter Vorsitz von R. Ferland. Hierzu werden Wochenlösungen der verschiedenen Analysezentren im SINEX-Format (*solution (software/technique) independent exchange format*; Blewitt et al., 1995) kombiniert, um offizielle IGS-Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten sowie IGS-ERP zu erzeugen. Eine Zusammenfassung der Resultate findet sich in den Dateien `igsyyPwww.sum` (yy: Jahr, www: GPS-Woche).

Abb. 5.36 zeigt für acht verschiedene IGS-Analysezentren die Maßstabsdifferenz gegenüber der jeweiligen IGS-Realisierung des ITRF. Vor der Umstellung auf das absolute Phasenzentrumsmodell in GPS-Woche 1400 (Gendt, 2006) war dies das IGB00 (IGS03P33_RS99.snx; Ferland, 2003), danach das IGS05 (IGS05.snx; Ferland, 2006; Khoda und Bruyninx, 2009). Aufgrund einer signifikanten Änderungsrate des Maßstabs bei Verwendung relativer Phasenzentrumskorrekturen (vgl. Tab. 5.8) konnte die mittlere Maßstabsdifferenz aller Analysezentren gegenüber dem IGB00 auf etwa 3 ppb anwachsen. Genau wie in Tab. 5.8 ist auch die Reduktion des mittleren Offsets in GPS-Woche 1400 (Abb. 5.36) nicht als Gewinn des absoluten Phasenzentrumsmodells zu werten. Erstens wurden dessen Parameter konsistent zum fixierten IGB00-Maßstab bestimmt, und zweitens hätte man auch bei Verwendung relativer Korrekturen die IGS-Realisierung des ITRF2005 (Altamimi et al., 2007) wohl so festlegen können, daß die Analysezentren zunächst nur eine kleine Maßstabsdifferenz aufgewiesen hätten. Ein deutliches Zeichen einer verbesserten Modellierung ist dagegen die bessere Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Lösungen. Während sich die Einzellösungen bis Anfang November 2006 um teilweise bis zu 4 ppb voneinander unterschieden, gingen diese Differenzen mit der Umstellung auf das absolute Antennenmodell auf nahezu die Hälfte zurück. Dies hängt jedoch auch mit einer konsistenteren Modellierung der Ozeanauflasten und anderen Verbesserungen zusammen (Gendt, 2006).

Betrachtet man nicht nur den Maßstab des gesamten Stationsnetzes, sondern die Koordinatenänderungen jeder einzelnen Station infolge der Anpassung des Antennenmodells, so zeigt sich, daß eine Interpretation hier schwieriger wird, da mehrere Effekte überlagert sind: (1) absolute statt relativer Modellierung der Phasenzentren, (2) satelliten- statt blockspezifischer z -Offsets für die Satellitenantennen, (3) Berücksichtigung von PCVs

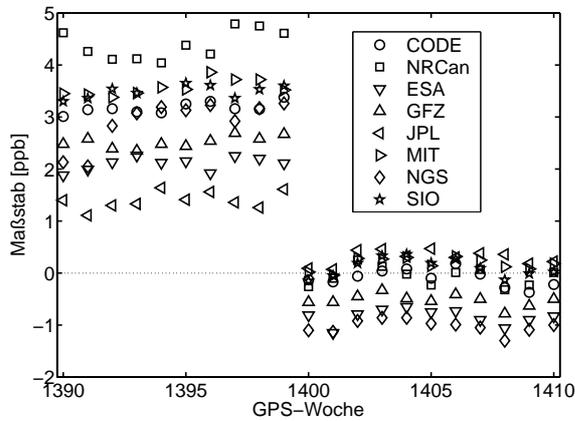


Abb. 5.36.: Maßstabsdifferenz [ppb] der Lösungen einzelner IGS-Analysezentren ggü. IGS00 (bis GPS-Woche 1399) bzw. ggü. IGS05 (ab GPS-Woche 1400) als Resultat einer Helmert-Transformation.

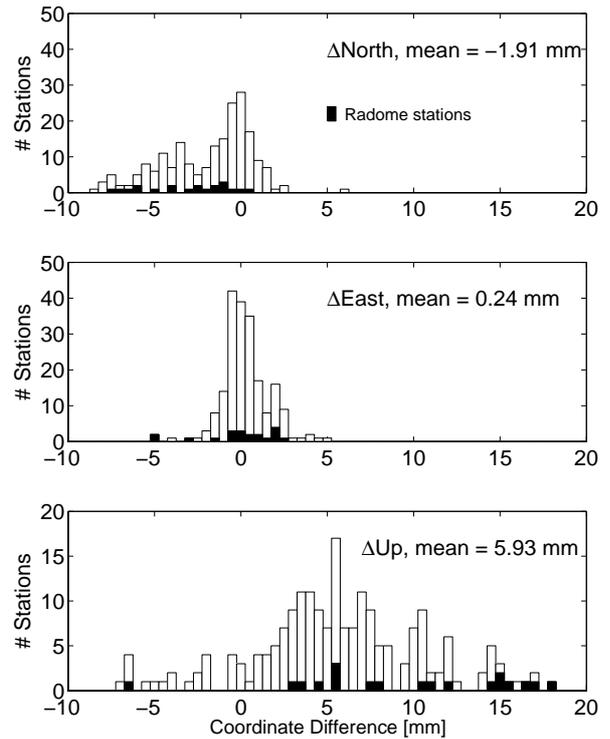


Abb. 5.37.: Histogramm der mittleren Koordinatenänderungen infolge des Umstiegs von relativen auf absolute Phasenzentrumskorrekturen in einem globalen Netz (Vergleich der Lösungen A und D aus Tab. 5.8). Der Einfluß unterschiedlicher Geozentren wurde eliminiert (Schmid et al., 2007).

der Satellitenantennen, (4) azimut- statt rein elevationsabhängiger PCVs für die wichtigsten Empfangsantennen sowie (5) Berücksichtigung des Radomeinflusses bei ca. einem Drittel der im IGS-Netz vorkommenden Antennen/Radom-Paare. Erschwert wird das ganze zusätzlich noch durch Veränderungen in der Antennenkonfiguration, die auf jeder Station von Zeit zu Zeit notwendig werden.

Abb. 5.37 zeigt für alle Stationen eines globalen Netzes die mittleren Koordinatenänderungen, die aus dem neuen Antennenmodell bei Verwendung aller Daten aus elf Jahren resultieren (Vergleich der Lösungen A und D in Tab. 5.8). Systematische Effekte aufgrund unterschiedlicher Lagerungen der Netze, die sich vor allem in den horizontalen Komponenten zeigten, wurden vorab durch eine 3-Parameter-Transformation beseitigt, in der drei Translationskomponenten zugelassen waren. Hätte man zusätzlich einen Maßstabsfaktor zugelassen, so wäre auch die systematische Änderung der Stationshöhen von ca. 6 mm verschwunden. Diese entspricht ziemlich genau dem Maßstabsunterschied von 0.95 ppb zwischen den Lösungen A und D (vgl. Tab. 5.8 und Kap. 5.2.4):

$$\Delta h \approx 6.4 \frac{\text{mm}}{\text{ppb}} \cdot \Delta s = 6.4 \frac{\text{mm}}{\text{ppb}} \cdot 0.95 \text{ ppb} \approx 6.1 \text{ mm} \quad (5.31)$$

Während das neue Antennenmodell in den Lagekomponenten Sprünge von bis zu ca. 5 mm verursacht, können diese in der Höhe gut 10 mm betragen, sofern man die Maßstabsdifferenz außer Acht läßt. Die Veränderungen in der Lage dürften zu einem großen Teil durch die Berücksichtigung azimutabhängiger PCVs für die Empfangsantennen hervorgerufen werden, bei der Höhenkomponente könnte das Vermeiden der systematischen Fehlereinflüsse relativer Phasenzentrumskorrekturen eine größere Rolle spielen. In vielen Fällen werden größere Stationshöhenänderungen auch durch die Berücksichtigung des Radomeinflusses verursacht (vgl. Kap. 5.1.5). Wichtig ist aber, daß nicht nur der verwendete Antennentyp eine Rolle spielt, sondern auch die lokale Umgebung der Station sowie die Position der Station im Gesamtnetz (vgl. Völksen, 2006).

Steigenberger et al. (2009) konnten zeigen, daß sich die Änderungen der Stationshöhe bei Stationen, die alle mit derselben Antenne (AOAD/M_T ohne Radom) ausgestattet waren, um 1–2 cm voneinander unterscheiden können. Daneben zeigen sich teilweise aber auch übereinstimmende Koordinatenänderungen für Stationen, die zwar mit verschiedenen Antennen ausgerüstet sind, sich aber in derselben geographischen Region befinden (Steigenberger

et al., 2009). Solche Änderungen könnten eine Auswirkung der verbesserten Modellierung der Satellitenantennen sein. Die hier beschriebenen Koordinatensprünge zeigen sich am Tage der Modellumstellung am 5. November 2006 auch als Unstetigkeitsstellen in den IGS-Koordinatenzeitreihen. Erst die vollständige konsistente Neuverarbeitung aller IGS-Daten durch mehrere Analysezentren im Rahmen eines großangelegten IGS-Reprozessierungsprojektes (Steigenberger et al., 2008) wird diese störenden Sprünge beseitigen können.

Um den Einfluß der Radomkalibrierungen genauer zu untersuchen, wurde eine weitere vollständige Mehrjahreslösung erzeugt, die identisch war mit Lösung D (Tab. 5.8), bei der jedoch die vorhandenen Radomkalibrierungen nicht berücksichtigt wurden. Ein Vergleich mit Lösung D lieferte also direkt den Effekt der Radome. Mit Sprüngen von maximal etwa 5 mm in der Lage und 10 mm in der Höhe konnten die Werte aus Abb. 5.37 bestätigt werden. Die Untersuchung machte jedoch noch auf einen anderen Punkt aufmerksam. Bei einigen Antennen/Radom-Kombinationen liegt für die Antenne ohne Radom eine absolute Roboterkalibrierung der Firma Geo++ GmbH vor, für die Antenne mit Radom dagegen eine konvertierte Feldkalibrierung des NGS (vgl. Kap. 5.1.3 und 5.1.4). Bei einem Vergleich wird also der Effekt des Radoms durch die Vernachlässigung azimuthaler PCVs verfälscht. Generell stellt sich dann die Frage, ob man durch Berücksichtigung des Radomeinflusses mehr gewinnen kann als man durch die Vernachlässigung azimuthaler Korrekturen einbüßt. In den meisten Fällen erkaufte man sich wohl eine merkliche Verbesserung in der Höhenkomponente durch eine geringe Verschlechterung der Lagekomponenten.

Vor der Umstellung auf das absolute Antennenkorrekturmodell äußerte sich beinahe jede Veränderung der Antennenkonfiguration auf einer Beobachtungsstation (Austausch der Antenne, Hinzu- bzw. Wegnahme des Radoms oder der Grundplatte, Veränderungen an der Halterung oder am Pfeiler etc.) in einer Unstetigkeitsstelle in der entsprechenden Koordinatenzeitreihe. In vielen Fällen kann durch das neue Modell eine deutliche Verringerung der Koordinatensprünge in den Zeitreihen erreicht werden (Steigenberger et al., 2009). Wie Klein und Klette (2005) sowie Wanninger et al. (2006) berichten, muß jedoch selbst bei individuell (absolut) kalibrierten Antennen mit Sprüngen von bis zu 1 cm in der Höhe gerechnet werden. Dies kann nur durch veränderte Mehrweegeinflüsse aus dem Nahfeld der Antenne erklärt werden, die durch jegliche Manipulation an der Antenne verursacht werden können, und die sich im Gegensatz zu den Mehrweegeinflüssen aus dem Fernfeld systematisch auf die Stationsposition auswirken (Wübbena et al., 2003). Um solche Sprünge genau ausmessen und später berücksichtigen zu können, sollten bei einem Antennenwechsel die alte und die neue Antenne über einen gewissen Zeitraum parallel betrieben werden (Moore, 2006). Würden, beispielsweise auf Fundamentalstationen, permanent mehrere Antennen parallel betrieben, so hätte dies den Vorteil, daß nicht nur Veränderungen an einzelnen Antennen, sondern auch generell der Einfluß der Umgebung auf die Stationsposition besser überwacht werden könnte (Schmid et al., 2005a).

Wenn alle Sprünge innerhalb einer Koordinatenzeitreihe korrigiert sind, lassen sich daraus Stationsgeschwindigkeiten ableiten. Reduziert man diese linearen Bewegungen, die überwiegend aus tektonischen Plattenverschiebungen resultieren, so verbleibt in der Regel ein jährliches Signal in der Zeitreihe. Ein solches kann z.B. durch örtliche Mehrweegeinflüsse oder durch Probleme mit der Modellierung von Auflasteffekten erklärt werden. Eliminiert man auch dieses eigentlich unerwünschte Signal, so erhält man mit dem verbleibenden Rauschen ein Maß für die Wiederholgenauigkeit der Stationskoordinaten. Diese liefert zum einen Auskunft über die Qualität einer Station, zum anderen aber auch über die Güte der bei der Koordinatenschätzung verwendeten Modelle. Laut Steigenberger et al. (2009) verbessert sich der mittlere RMS (*root mean square*) der Höhenkomponente mehrjähriger Koordinatenzeitreihen mit der Umstellung auf absolute Phasenzentren um etwa 0.5 mm auf 8 mm. Die Lage der Stationen verbessert sich ebenfalls leicht, jedoch nicht signifikant.

Während bei GNSS-internen Untersuchungen teilweise die Gefahr besteht, daß lediglich die Konsistenz zwischen der Schätzung eines Modells und dem anschließenden korrekten Anbringen des Modells überprüft wird, liefern Vergleiche mit anderen geodätischen Raumverfahren wertvolle unabhängige Kontrollmöglichkeiten. Da das neue Antennenmodell einen Einfluß auf die Koordinaten hat, besteht die Möglichkeit, die Differenzvektoren zwischen benachbarten GPS-Antennen und VLBI-Teleskopen zu untersuchen. Dabei kommen dann aber sowohl mit den VLBI-Beobachtungen als auch mit der örtlichen Vermessung auf einer Beobachtungsstation weitere Fehlerquellen ins Spiel. Die Differenzvektoren zwischen den Bezugspunkten verschiedener Raumverfahren (sog. *local ties*) lassen sich zum einen aus den einzelnen Koordinatenlösungen der Raumverfahren errechnen und zum anderen vor Ort nach herkömmlichen Verfahren bestimmen. Je kleiner die Diskrepanzen, desto besser sind systematische verfahrensspezifische Effekte unter Kontrolle.

Die TUM und das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut (DGFI) erzeugten für den Zeitraum der zweiwöchigen VLBI-Kampagne CONT02 (Thomas und MacMillan, 2003) konsistente globale GPS- und VLBI-Lösungen, die sowohl im Hinblick auf die verwendeten Modelle als auch hinsichtlich der Parametrisierung harmonisiert wurden (Thaller et al., 2005a, vgl. Kap. 4.2.2). Die Lösungen beinhalteten acht Stationen (vgl. Tab. 6.1), auf denen GPS- und VLBI-Messungen in unmittelbarer Nachbarschaft durchgeführt wurden. Krügel et al. (2007) konnten unter Verwendung des Softwarepaketes DOGS-CS (*DGFI Orbit and Geodetic Parameter Estimation Software – Combination and Solution*) zeigen, daß die Differenzvektoren zwischen geschätzten Koordinaten deutlich besser mit

Tab. 5.9.: Mittlere Differenz der Stationsgeschwindigkeiten aus GPS- und VLBI-Beobachtungen für 23 Beobachtungsstationen (P. Steigenberger, pers. Mitteilung).

Geschwindigkeitskomponente	Nord	Ost
relatives IGS-Modell	2.3 mm/a	1.6 mm/a
absolutes IGS-Modell	1.5 mm/a	0.9 mm/a

lokalen Meßresultaten übereinstimmen, wenn absolute Korrekturwerte für die GPS-Phasenzentren und aktualisierte Achsenoffsets für die VLBI-Teleskope verwendet werden. Der größte Teil der Verbesserungen ist hierbei zwar den VLBI-Achsenoffsets zuzuschreiben, wie Abb. 5.38 zeigt, verringert sich der Fehler in der Höhendifferenz jedoch auch allein durch den Umstieg auf absolute Phasenzentrumskorrekturen signifikant.

Unterschiede zwischen Abb. 5.38 und den Resultaten von Krügel et al. (2007) lassen sich durch Verwendung einer anderen Software zum Kombinieren der Resultate (*Bernese GPS Software*) sowie durch aktualisierte Angaben zu lokalen Vermessungen erklären (D. Thaller, pers. Mitteilung). Restfehler in den *local ties* hängen dabei in einigen Fällen mit dem nicht modellierten Einfluß von Radomen auf den GPS-Antennen zusammen (vgl. Kap. 5.1.5). So liegen bis heute keine Kalibrierungen für die Antennen/Radom-Kombinationen in Fairbanks, Onsala und Ny-Ålesund vor. Darüber hinaus berichten Ray und Altamimi (2005), daß nicht alle örtlichen Vermessungen eine vergleichbare Qualität aufweisen.

Steigenberger et al. (2009) verglichen im Rahmen ihrer Untersuchungen zum Einfluß verschiedener Phasenzentrumsmodelle auf GPS-Referenzrahmen auch die entsprechenden Stationsgeschwindigkeiten mit denjenigen einer vergleichbaren VLBI-Lösung des DGFI. Auch hier zeigte sich bei Verwendung absoluter Korrekturen für die GPS-Phasenzentren eine deutlich bessere Übereinstimmung mit der VLBI-Lösung (s. Tab. 5.9). Die Mängel des relativen IGS-Modells hatten also auch einen systematischen Einfluß auf die Schätzung von Stationsgeschwindigkeiten in einem globalen Netz.

5.3.2. Satellitenbahnen

GNSS-Messungen beziehen sich sowohl beim Empfänger als auch beim Satelliten auf das Phasenzentrum. Da zum Übergang auf das Massenzentrum, für das die entsprechenden Bahnparameter angegeben werden, demnach die Phasenzentrumskorrekturen benötigt werden, würde man eigentlich erwarten, daß sich eine Verbesserung des Phasenzentrumsmodells auch positiv auf die Bahnengenauigkeit auswirkt. Aufgrund des relativ geringen Öffnungswinkels beim Satelliten ($z' < 14.3^\circ$) können radiale Fehler im Phasenzentrum allerdings zu einem großen Teil von der Satellitenuhrschätzung aufgefangen werden (vgl. Kap. 5.2.2; Cardellach et al., 2007). Dies zeigt sich z.B. auch darin, daß Vergleiche mit unabhängigen SLR-Messungen für GPS-Satelliten mit unterschiedlichen z -Offsets denselben systematischen Versatz zeigen (Urschl et al., 2005, 2008, vgl. Kap. 5.2.6). Im Umkehrschluß heißt dies für die Vergleiche mit SLR jedoch auch, daß das absolute Phasenzentrumsmodell nicht wesentlich zur Erklärung der Diskrepanz zwischen den GNSS und SLR in radialer Richtung beitragen kann.

Auch die Statistiken⁴ des IGS-Analysekoordinators (*IGS Analysis Center Coordinator*) zeigen für den Zeitpunkt der Modellumstellung in GPS-Woche 1400 keine größeren Veränderungen für die Bahnparameter. Der Maßstab der Satellitenbahnen scheint zwar etwas konsistenter von den verschiedenen Analysezentren realisiert zu werden, doch könnte dies auch mit einer der anderen zeitgleich vorgenommenen Modellverbesserungen (Gendt, 2006) zusammenhängen.

Eine gewisse Verbesserung der Satellitenbahnen läßt sich schließlich aber doch feststellen. Die Veränderungen sind dabei zwar klein, wirken sich auf die einzelnen Satelliten allerdings konsistent positiv aus. Der Hintergrund ist der, daß GPS-Bahnbögen in der Regel für Zeitintervalle von 24 Stunden geschätzt werden. Da an den Tagesgrenzen Sprünge auftreten, lassen sich diese Bahnbögen jedoch nicht fehlerfrei zu längeren Bögen kombinieren. Abb. 5.39 zeigt für jeden einzelnen Satelliten den mittleren Rückgang des RMS bei der Anpassung einer 3-Tages-Bahn an drei eintägige Bahnbögen für verschiedene Modellverbesserungen, jeweils berechnet aus den gesamten Daten von elf Jahren.

In Abb. 5.39a werden die Lösungen A und B aus Tab. 5.8 miteinander verglichen. Statt relativer Empfängerantennen-PCVs kommen also absolute Werte, kombiniert mit blockspezifischen PCOs und PCVs für die Satellitenantennen, zum Einsatz. Angesichts des gesamten Fehlerbudgets von wenigen cm zeigt sich bei Block II/IIA

⁴http://www.gfz-potsdam.de/pb1/igsacc/index_igsacc.html

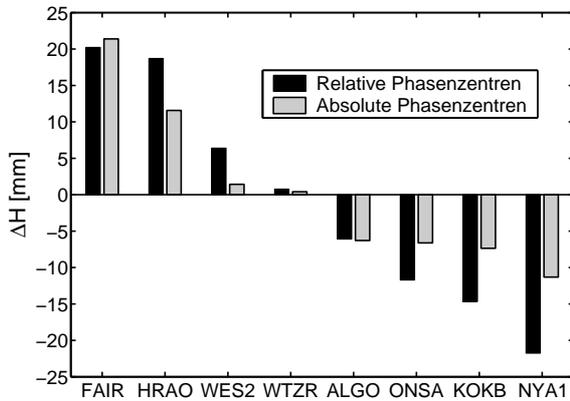


Abb. 5.38.: Differenzen zwischen geschätztem Höhenunterschied (zwischen GPS-Antenne und VLBI-Teleskop) und örtlichen Vermessungen für acht Beobachtungsstationen. Die Maßstabsdifferenz zwischen GPS- und VLBI-Lösung wurde eliminiert. Die Kürzel entsprechen den IGS-Namen für die GPS-Stationen.

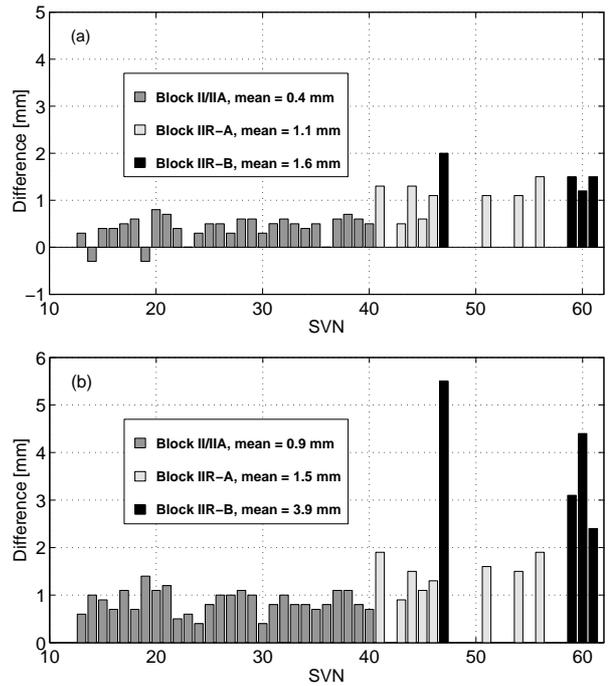


Abb. 5.39.: Verringerung des RMS bei der Anpassung einer 3-Tages-Satellitenbahn an drei eintägige Bahnbögen beim Übergang (a) von relativen (Lösung A) auf absolute PCVs mit blockspezifischen PCOs (Lösung B) bzw. (b) von relativen (Lösung A) auf absolute PCVs mit satellitenspezifischen PCOs (Lösung D) (Schmid et al., 2007).

lediglich eine marginale Verbesserung von etwa einem halben mm. Auffällig ist jedoch, daß vier Satelliten, die laut Tab. 5.5 einen relativ stark vom Blockmittelwert abweichenden z -Offset aufweisen, keine Verbesserung zeigen (SVN23 und SVN36) oder sich gar verschlechtern (SVN14 und SVN19). Erst durch den Einsatz satellitenspezifischer PCOs (Abb. 5.39b) kann auch für diese vier Satelliten eine Verbesserung erzielt werden, was die Korrektheit der satellitenspezifischen Korrekturwerte untermauert. Satellit SVN19, der über den größten individuellen Offset verfügt (274.4 cm im Vergleich zum Mittelwert von 239.6 cm), unterstreicht dies mit der größten Verbesserung für einen Block II/IIA-Satelliten beim Vergleich der Lösungen A und D.

Für Lösung B wurde noch nicht zwischen Block IIR-A und Block IIR-B unterschieden, d.h. es wurde ein mittlerer PCO für Block IIR verwendet. Infolgedessen resultieren die Verbesserungen in Abb. 5.39a allein aus der Berücksichtigung der PCVs der Satellitenantennen. Da letztere für Block IIR verhältnismäßig große Werte annehmen (vgl. Abb. 5.26), fällt der Rückgang des RMS allerdings deutlicher aus als bei Block II/IIA. Führt man satellitenspezifische PCOs ein (Abb. 5.39b), so profitieren davon im Vergleich zu Abb. 5.39a vor allem die Block IIR-B-Satelliten, da sie auf das PCO-Mittel für Lösung B aufgrund ihrer geringen Anzahl kaum Einfluß hatten. Im Vergleich zwischen relativem und absolutem IGS-Modell (Abb. 5.39b) verbessert sich Block IIR-B/M also deutlich um etwa 4 mm, obwohl die an Bord befindlichen momentan modernsten Satellitenantennen die geringsten Schwankungen im PCO unter den einzelnen Satelliten aufweisen (vgl. Tab. 5.5 und Abb. 5.25). Dies liegt zum einen an den beachtlichen PCVs (vgl. Abb. 5.26), die im relativen Modell vernachlässigt werden, zum anderen aber vor allem auch an der Vernachlässigung der PCO-Differenz zwischen Block IIR-A und Block IIR-B/M (vgl. Tab. 5.5). Der Vorteil, den das absolute Phasenzentrumsmodell für die Satellitenbahnen mit sich bringt, wird also quasi mit jedem neu gestarteten Block IIR-M-Satelliten größer.

Kang et al. (2007) untersuchten den Einfluß verschiedener PCO-Modelle auf die Bahnen tieffliegender Satelliten. Leider wird dabei nicht klar, ob auch die zugehörigen PCVs der GPS-Satellitenantennen berücksichtigt werden, und ob konsistente Phasenzentrumskorrekturen für die Antennen an Bord der LEOs sowie im IGS-Stationsnetz am Boden zur Anwendung kommen. Wie zu erwarten wirken sich auch PCO-Differenzen von über 1 m kaum auf die Bahnen der untersuchten GRACE-Satelliten aus. Die Tatsache, daß einige der von Kang et al. (2007) angeführten Vergleiche die PCO-Werte des JPL leicht im Vorteil sehen, dürfte auch damit zusammenhängen, daß letztere u.a. aus GRACE-Daten abgeleitet wurden (vgl. Kap. 5.2.5).

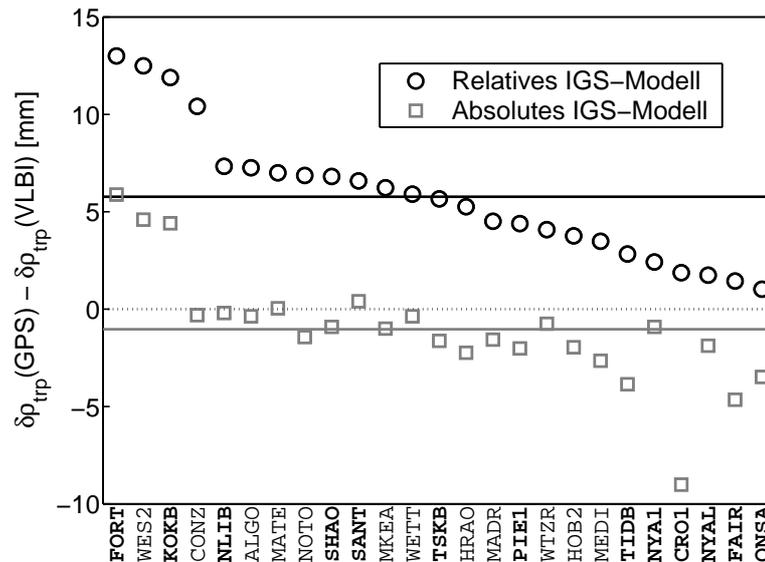


Abb. 5.40.: Mittlere Differenz [mm] zwischen GPS- und VLBI-Schätzwert für die troposphärische Refraktion in Zenitrichtung aus den Daten von 11 Jahren für 25 direkt benachbarte GPS- und VLBI-Antennen unter Verwendung relativer bzw. absoluter Phasenzentrumskorrekturen. Die Mittelwerte (horizontale Linien) betragen +5.8 mm für das relative Modell sowie -1.0 mm für das absolute. Stationen, deren GPS-Antenne durch ein Radom geschützt wird, sind fettgedruckt. Die Kürzel entsprechen den IGS-Namen für die GPS-Stationen.

5.3.3. Troposphäre

Da auch Troposphärenparameter stark mit den Phasenzentren korreliert sind, ergeben sich auch hier Parameteränderungen, die sich durch Vergleiche mit unabhängigen geodätischen Raumverfahren validieren lassen. Befinden sich verschiedene Mikrowellentechniken an ein und demselben Ort, so sollten diese bei gleichzeitigen Messungen dieselbe atmosphärische Verzögerung registrieren, da die beteiligten Signale dieselbe Atmosphäre durchqueren müssen, um zur Beobachtungsstation zu gelangen. Ein Unterschied dürfte sich nur aufgrund des in aller Regel vorhandenen Höhenunterschiedes zwischen den Bezugspunkten der verschiedenen Meßtechniken ergeben. Reduziert man rechnerisch diese, von der Stationshöhe abhängige, theoretische Differenz von ca. 3 mm troposphärischer Refraktion je 10 m Höhenunterschiedes, so weisen die verbleibenden Abweichungen auf mögliche Probleme mit technikspezifischen systematischen Fehlern hin.

Wie Schuh und Boehm (2003) und andere zeigen konnten, lieferten Vergleiche der troposphärischen Refraktion zwischen benachbarten GPS- und VLBI-Antennen stets eine positive Differenz, was bedeutet, daß sich aus den GPS-Daten eine größere Troposphärenzenitverzögerung ergab als aus den VLBI-Daten. Schmid et al. (2005b) konnten anhand der Daten aus dem Zeitraum der CONT02-Kampagne (Thomas und MacMillan, 2003) belegen, daß dieser systematische Fehler zu einem großen Teil mit der Verwendung des relativen Korrekturmodells für die GPS-Phasenzentren zusammenhing. Mit Hilfe der Resultate des GPS-Reprozessierungsprojektes von TUM und TUD (Steigenberger et al., 2006) sowie konsistenter VLBI-Lösungen des DGFI konnten die Vergleiche von 8 auf über 20 Stationen sowie von 2 Wochen auf 11 Jahre ausgeweitet werden. Dabei hatte die größere Datenmenge jedoch kaum einen Einfluß auf die Ergebnisse für die in beiden Datensätzen vorhandenen Stationen (Thaller et al., 2006). Der mittlere Fehler von +5.3 mm für alle Stationen unter Verwendung des relativen Modells (Lösung A in Tab. 5.8) verringerte sich zunächst etwa auf die Hälfte (-2.5 mm), wenn stattdessen absolute blockspezifische Korrekturen zum Einsatz kamen (Lösung B). Satellitenspezifische PCOs (Lösung C) brachten einen weiteren deutlichen Rückgang auf schließlich -0.8 mm, während die Streuung um den Mittelwert in allen drei Fällen gut 3 mm betrug (Schmid et al., 2007).

Die zuletzt erzeugten GPS- und VLBI-Lösungen umfassen inzwischen knapp 40 Paare von VLBI-Teleskopen und benachbarten GPS-Antennen, wobei sich teilweise mehrere GPS-Antennen in der Umgebung ein und desselben VLBI-Teleskops befinden. Aus diesen wurden für Abb. 5.40 diejenigen 25 ausgewählt, die über mehr als 500 gemeinsame Meßepochen verfügen, und die in vertikaler Richtung nicht weiter als 100 m voneinander entfernt liegen. Neben verschiedensten Modellverbesserungen (GPS: Berücksichtigung von Ionosphärentermen höherer Ordnung, verbessertes Ozeangezeitenmodell etc.; VLBI: Berücksichtigung temperaturabhängiger Teleskopdeformationen) wurden im Gegensatz zu den Resultaten von Schmid et al. (2007) keine identischen a priori-Werte für den trockenen Anteil der troposphärischen Zenitverzögerung für GPS und VLBI verwendet, sondern bereits hier

der Höhenunterschied zwischen den Instrumenten berücksichtigt. Dies hat den Vorteil, daß später nur noch der geschätzte feuchte Anteil um den Höhenunterschied korrigiert werden muß. Außerdem wurde der a priori-Wert für den trockenen Anteil nicht mit der *Niell (1996) Mapping Function*, sondern mit der verbesserten *Isobaric Niell (2000) Mapping Function* in die entsprechende Beobachtungsrichtung umgerechnet. Die theoretische Differenz im feuchten Anteil wurde ausgehend von einer Standardatmosphäre nach Berg (1948) mit Hilfe des Modells von Saastamoinen (1973) berechnet und schließlich von der Differenz aus GPS- und VLBI-Schätzwert abgezogen.

In Abb. 5.40 werden für das relative sowie das absolute Phasenzentrumsmodell des IGS (Lösungen A und D aus Tab. 5.8) die Troposphärendifferenzen gegenüber VLBI dargestellt. Da das absolute Modell für keine der mit einem Radom versehenen GPS-Antennen eine Kalibrierung bereithält, unterscheiden sich die Resultate kaum von den oben bereits erwähnten. Die Diskrepanzen für relative Phasenzentrumskorrekturen, nach denen die Stationen in Abb. 5.40 sortiert sind, ergeben einen Mittelwert von +5.8 mm (bei einer Streuung von 3.4 mm). Unter Verwendung des absoluten Modells zeigt sich mit -1.0 mm (Streuung: 3.0 mm) ein deutlich kleinerer Wert. Die vergleichsweise große Streuung von 3 mm wird hauptsächlich durch GPS-Stationen verursacht, auf denen sich Radome befinden, für die es keine passenden Kalibrierungen gibt (fettgedruckt in Abb. 5.40). Stattdessen werden die Korrekturwerte für die entsprechende Antenne ohne Radom verwendet (vgl. Kap. 5.1.5). Allein bei sechs der sieben Stationen mit den größten Restfehlern ist dies der Fall: FORT, KOKB, ONSA, TIDB, FAIR und CRO1. In Westford (WES2) und Onsala (ONSA) befindet sich zusätzlich auch das VLBI-Teleskop unter einer schützenden Hülle. Neben den Einflüssen der GPS- und VLBI-Radome könnten die verbliebenen Restfehler auch durch verschiedene andere Effekte verursacht sein. Örtliche Mehrwegeeffekte oder Veränderungen in der Antennenkonfiguration auf Seiten von GPS bzw. elevationsabhängige gravitative Verformungen des Teleskops auf Seiten von VLBI könnten mögliche weitere Ursachen sein. Daneben sind auch die verwendeten *mapping functions* zur Umrechnung einer Zenitverzögerung in die entsprechende Beobachtungsrichtung noch verbesserungsfähig (vgl. Kap. 2.2.2; Boehm et al., 2006a,b).

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bieten die Messungen von Wasserdampfadiometern (*water vapor radiometers* WVRs), mit denen direkt der feuchte Anteil der troposphärischen Refraktion bestimmt werden kann. Hierbei wird die Helligkeitstemperatur der von der Atmosphäre emittierten Mikrowellenstrahlung gemessen, deren Intensität von der Dicke der zu durchdringenden Luftschichten abhängt (Janssen, 1993). Theoretisch bestünde die Möglichkeit, WVR-Resultate zu verwenden, um den feuchten Anteil der troposphärischen Refraktion bei GNSS- oder VLBI-Auswertungen direkt zu korrigieren, vorausgesetzt, die entsprechenden Instrumente befinden sich am selben Ort. Mit den relativ hoch aufgelösten Messungen des tatsächlichen Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre ließe sich das Problem der schwierigen Modellierbarkeit des örtlich und zeitlich hoch variablen feuchten Anteils umgehen. Dennoch kommen WVR-Messungen bis heute nicht operationell zum Einsatz (Nothnagel et al., 2007). Laut Keilm et al. (2002) liegt dies vor allem an den Schwierigkeiten, das WVR zu kalibrieren und den Zusammenhang zwischen Helligkeitstemperatur und verschiedenen atmosphärischen Parametern zu modellieren.

Daß die Ursachen für Unstimmigkeiten zwischen WVR-Messungen und den geodätischen Raumverfahren jedoch nicht allein auf Seiten der Radiometrie zu suchen sind, zeigt sich beim Vergleich verschiedener GPS-Phasenzentrumsmodelle. Hierfür eignen sich wiederum Daten aus dem Zeitraum der CONT02-Kampagne. Während dieser kontinuierlichen VLBI-Kampagne wurden sowohl in Wettzell als auch in Onsala WVRs betrieben. Analysen des feuchten Anteils der Zenitverzögerung durch Elgered und Haas (2003) zeigten, daß für die Station Onsala zwischen GPS und VLBI einerseits sowie zwei verschiedenen Radiometertypen andererseits eine Diskrepanz von etwa 5 mm besteht. Einen solchen Wert erzielten auch Schmid et al. (2005b), wenn sie relative GPS-Phasenzentrumskorrekturen verwendeten. Mit absoluten Korrekturen verringerte sich die Differenz zwischen GPS-Schätzwert und WVR-Messung auf knapp 1 mm, während sich aber gleichzeitig die Übereinstimmung zwischen GPS und VLBI verschlechterte (vgl. Abb. 5.40). Wie der verbleibende Restfehler von ca. 20 mm für die Station Wettzell (vgl. Thaller et al., 2006) verdeutlicht, ist die Aussagekraft von GNSS-WVR-Vergleichen jedoch nach wie vor beschränkt. Abb. 5.40 macht allerdings deutlich, daß dies nicht allein mit den Problemen der Wasserdampfadiometrie begründet werden kann.

Aussagekräftiger sollten Vergleiche mit den Daten von Wettermodellen sein, die sich auf ein globales Netz unzähliger Sensoren stützen. Das *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) bietet mit dem *total column water vapor* (TCWV) beispielsweise den Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre mit einer 6-stündigen Auflösung für ein globales Gitter an. Dieser sollte dem in der Geodäsie gebräuchlichen *integrated water vapor* (IWV) entsprechen, der ebenfalls in kg/m^2 angegeben wird. Zwischen dem IWV und dem *integrated precipitable water vapor* IPWV besteht daneben folgender Zusammenhang (Kleijer, 2004):

$$\text{IPWV} = \text{IWV} / \rho_w \quad (5.32)$$

Durch Division mit der Dichte des Wassers ρ_w erhält man eine Größe in mm, deren Wert sich dabei nicht verändert. IPWV und IWV (und damit auch TCWV) unterscheiden sich damit also nur hinsichtlich ihrer Einheit.

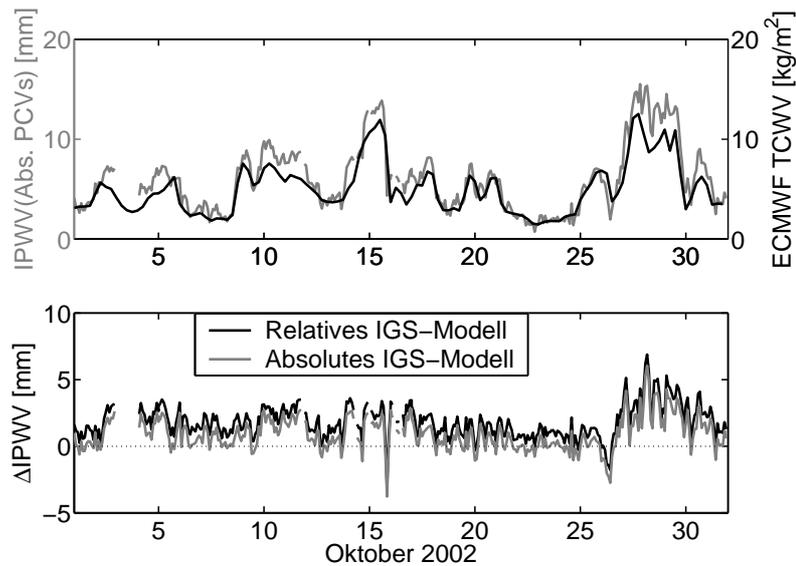


Abb. 5.41.: Vergleich des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre über der Station O'Higgins (Antarktis) im Oktober 2002. Oben: GPS-Schätzung (absolutes IGS-Modell, 2-stündige Auflösung) gegenüber Wettermodell-Daten des ECMWF (6-stündig), unten: Differenz zwischen GPS-Schätzung und Wettermodell unter Verwendung des relativen bzw. absoluten IGS-Phasenzentrumsmodells. Die mittlere Differenz beträgt 1.8 mm für das relative Modell sowie 0.9 mm für das absolute.

Um schließlich vom IPWV zum feuchten Anteil der Troposphärenzenitverzögerung zu gelangen, muß ersterer mit einem örtlich und zeitlich veränderlichen Wert von etwa 6.5 multipliziert werden (Bouma, 2002; Kleijer, 2004).

Besonders geeignet für Troposphärenvergleiche erscheinen Stationen in polaren Regionen, da hier der Wasserdampfgehalt generell niedrig und auch zeitlich wenig variabel ist. Abb. 5.41 zeigt in der oberen Hälfte den Vergleich des Wasserdampfgehaltes aus einer GPS-Lösung mit den Daten des ECMWF für die Station O'Higgins in der Antarktis ($63^{\circ}19' \text{ S}$, $57^{\circ}54' \text{ W}$). Für die GPS-Lösung wurden dabei absolute Phasenzentrumskorrekturen verwendet, die ECMWF-Werte repräsentieren der Einfachheit halber die Daten des nächstgelegenen Gitterpunktes (63° S , 58° W). In der unteren Hälfte von Abb. 5.41 ist schließlich die Differenz zwischen GPS-Schätzwert und ECMWF-Modellwert dargestellt, die idealerweise Null sein sollte. Unter Verwendung des relativen IGS-Modells zeigt sich allerdings eine mittlere Diskrepanz von 1.8 mm, die durch den Umstieg auf das absolute Modell zumindest halbiert werden kann.

6. Vergleich von GPS- und VLBI-Resultaten

6.1. Kampagne CONT02

Bei CONT02 (*Continuous VLBI Campaign 2002*; Thomas und MacMillan, 2003) handelt es sich um eine zweiwöchige VLBI-Kampagne, an der sich insgesamt acht Teleskope mit quasi kontinuierlichen Beobachtungen beteiligten. Sie wurde durchgeführt vom 16. bis zum 31. Oktober 2002 mit dem Ziel, bestmögliche VLBI-Daten nach aktuellem Stand der Technik zu gewinnen. Mit diesen sollte dann untersucht werden, welche Genauigkeiten für die Zielparameter mit Hilfe der VLBI-Technik bestenfalls erreicht werden können. Vergleichbare Kampagnen hatten auch bereits in den Jahren 1989 (*Extended Research and Development Experiment ERDE*), 1992 (SEARCH92), 1994 (CONT94), 1995 (CONT95) und 1996 (CONT96) stattgefunden (Chao and Ray, 1997); später folgte noch eine Kampagne im Jahre 2005 (CONT05; MacMillan et al., 2006).

Speziell untersucht werden sollten subtägliche Gezeitenmodelle, insbesondere die Frequenzen M2 und S1. Die kontinuierlichen Daten sollten auch zu einer hochaufgelösten Schätzung von Troposphärenparametern herangezogen werden, um diese mit GPS- und WVR-Resultaten vergleichen zu können. Von besonderem Interesse war daneben die tägliche Wiederholbarkeit des Referenzrahmens, eine subtägliche Schätzung von Stationskoordinaten zur Untersuchung von Teleskopdeformationen o.ä. sowie intensive Vergleiche mit GPS und SLR.

Die acht beteiligten Beobachtungsstationen verteilten sich auf Europa, Nordamerika und Afrika, während Südamerika, Asien und Australien nicht vertreten waren (s. Abb. 6.1). Mit nur einer Station auf der Südhalbkugel ist die Netzgeometrie damit also alles andere als optimal. Vor allem durch die Hinzunahme der beiden Stationen in Tsukuba (Japan) und Concepción (Chile) konnte für CONT05 in dieser Hinsicht eine deutliche Verbesserung erzielt werden (MacMillan et al., 2006). Da es an dieser Stelle jedoch lediglich um den Vergleich verschiedener Softwarepakete unter Verwendung identischer Beobachtungsdaten geht, und da Vergleichsdaten aus den Kombinationsstudien von FESG und DGFI für CONT02 vorliegen (vgl. Kap. 4.2.2), werden im folgenden keine CONT05-Daten berücksichtigt.

Tab. 6.1 enthält die acht CONT02-Beobachtungsstationen. Vorherrschender Montierungstyp ist die Altazimut-Montierung mit Azimut- und Elevationsachse (vgl. Kap. 2.2.3). Zwei der Teleskope (Onsala, Westford) werden von einem Radom geschützt. Auf allen acht Stationen befindet sich auch mindestens eine GPS-Antenne, die permanent Daten liefert. Jeweils eine dieser Antennen je Station wurde für Vergleiche und Kombinationsstudien ausgewählt, wobei es sich in allen Fällen um offizielle IGS-Stationen handelt. In Tab. 6.1 sind auch die während der CONT02-Kampagne auf den IGS-Stationen installierten Antennentypen aufgelistet. Drei der Antennen tragen Radome, deren Einfluß auf die Phasenzentrumsposition aufgrund fehlender Kalibrierungen jedoch nicht berücksichtigt werden kann. Bei der Auswertung wird in diesen Fällen daher so getan, als wäre kein Radom vorhanden, was

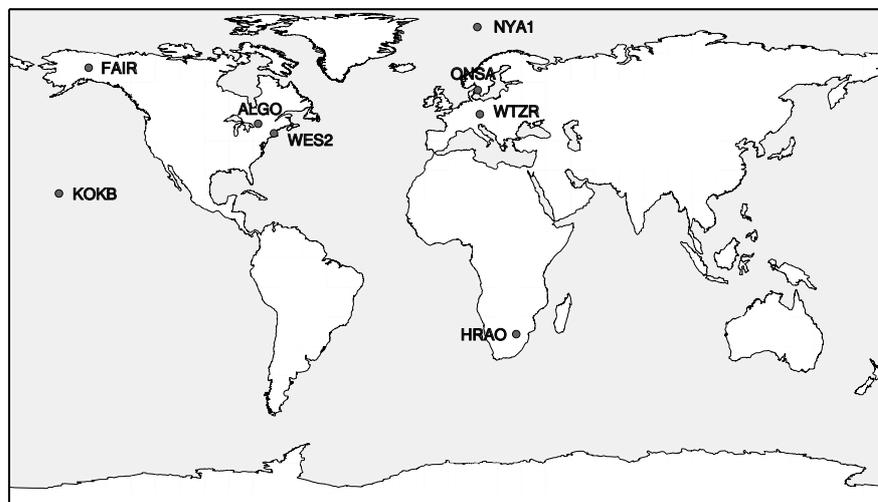


Abb. 6.1.: Verteilung der an der CONT02-Kampagne beteiligten VLBI-Teleskope.

Tab. 6.1.: An der Kampagne CONT02 beteiligte Beobachtungsstationen samt Informationen zu den dort befindlichen IVS-Teleskopen (8-stelliger IVS-Name, Montierungstyp, Radom vorhanden?) bzw. IGS-Antennen (4-stelliger IGS-Name, Antennentyp, Radomtyp).

Station	Land	IVS-Station			IGS-Station		
		Name	Montierung	Radom	Name	Antennentyp	Radom
Algonquin Park	CAN	ALGOPARK	AZEL	–	ALGO	AOAD/M_T	–
Fairbanks/Gilmore Creek	USA	GILCREEK	X-YN	–	FAIR	AOAD/M_T	JPLA
Hartebeesthoek	RSA	HARTRAO	EQUA	–	HRAO	AOAD/M_T	–
Kokee Park	USA	KOKEE	AZEL	–	KOKB	ASH701945C_M	–
Ny-Ålesund	NOR	NYALES20	AZEL	–	NYA1	ASH701073.1	SNOW
Onsala	SWE	ONSALA60	AZEL	x	ONSA	AOAD/M_B	OSOD
Westford	USA	WESTFORD	AZEL	x	WES2	AOAD/M_TA_NGS	–
Wettzell	GER	WETTZELL	AZEL	–	WTZR	AOAD/M_T	–

jedoch systematische Fehler in der Stationshöhe hervorrufen kann (vgl. Kap. 5.1.5). Die GPS-Daten der acht Stationen wurden als Teil eines globalen Netzes, bestehend aus insgesamt 153 gut verteilten Stationen, verarbeitet, um eine möglichst stabile Lösung zu erhalten (Thaller et al., 2006; Thaller, 2008).

Das CONT02-Datenmaterial ist leider nicht völlig lückenlos. Die Station Algonquin Park mußte beispielsweise einen ganztägigen Ausfall verkraften, beginnend am 26. Oktober um 18 Uhr UTC. Und auch die Beobachtungszeitreihen von Kokee Park und Wettzell weisen mehrere kleine Lücken auf, da von diesen beiden Stationen während des CONT02-Zeitraumes an insgesamt neun Tagen für jeweils etwa 1 h *Intensive*-Messungen zur Bestimmung von UT1 durchgeführt wurden (Thaller, 2008, vgl. Kap. 3.3.5). Das teilweise Fehlen von Beobachtungsdaten verursacht insbesondere Lücken in den Zeitreihen stationsabhängiger Parameter wie der troposphärischen Refraktion (vgl. Kap. 6.3.1).

6.2. Grenzen der Beobachtungssessionen

Während es bei anderen Beobachtungstechniken üblich ist, 24-stündige Beobachtungssessionen um 0 Uhr UTC zu beginnen, hat sich beim IVS ein Beobachtungsbeginn zwischen 17 und 19 Uhr UTC eingebürgert. Die Startzeitpunkte der verschiedenen VLBI-Beobertungskampagnen lassen sich dem Beobachtungsprogramm¹ des IVS entnehmen. Solange die VLBI-Beobachtungen isoliert ausgewertet werden, stellt dies absolut kein Problem dar. Sobald jedoch versucht wird, VLBI-Resultate mit anderen Beobachtungstechniken zu vergleichen oder zu kombinieren, können Probleme auftreten, wenn die Gültigkeitsbereiche der Parameter nicht übereinstimmen. Während niedrig aufgelöste Parameter wie z.B. Stationsgeschwindigkeiten sowie hoch aufgelöste subtägliche Parameter in der Regel weniger kritisch sind, tritt das Problem bei täglichen und halbtäglichen Parametern am deutlichsten zutage. Während sich die Zeitfenster täglicher Parameter um immerhin 17–19 h (ca. 70–80% der 24-stündigen Zeitintervalle) überlappen, sind es bei halbtäglichen Parametern nur 6–7 h (ca. 50–60% der 12-stündigen Intervalle).

Der IVS hat sich des Problems in der Zwischenzeit angenommen. Zwar wurde an den Startzeitpunkten der Kampagnen bislang nicht gerüttelt, dafür wurden jedoch Daten neu aufbereitet, um sie in Intervallen von 0 bis 24 Uhr UTC bereitstellen zu können. Demonstriert wurde diese Möglichkeit anhand der Daten der CONT05-Kampagne, bei der jeweils um 17 Uhr UTC eine neue Session gestartet wurde (Bertarini et al., 2007). Im Prinzip wurden dabei die Daten aufeinanderfolgender Sessionen miteinander verschmolzen. Da jedoch die Zeitpunkte, auf die sich die einzelnen Beobachtungen beziehen, nicht über die Sessionsgrenzen hinweg konsistent sind, ist dieser Schritt nicht trivial. Diese Inkonsistenz läßt sich darauf zurückführen, daß die verschiedenen IVS-Korrelatoren unterschiedliche Modelle für die Stationsuhren einsetzen. Im Falle der CONT05-Kampagne wurde der Aufwand zur Korrelation der insgesamt 15 ganztägigen Experimente auf drei Korrelatoren (Bonn, Haystack, Washington) verteilt. Ein weiteres Problem sind sog. *PCAL* (*phase calibration*) *jumps*, die laut Bertarini et al. (2007) allerdings nur im S-Band auftreten.

Vor der Verarbeitung der CONT02-Daten mit Hilfe der *Bernese GPS Software* erfolgte ebenfalls eine Umgruppierung der Beobachtungen. Alle Beobachtungen zwischen 0 und 24 Uhr eines bestimmten Tages wurden in einer

¹<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/master.html>

Datei zusammengefaßt, um diese anschließend ins *Bernese*-Format zu konvertieren. Eine Korrektur der Uhrensprünge an den Sessionsgrenzen erfolgte bei diesem Schritt, der nicht automatisiert wurde, jedoch nicht. Aus diesem Grunde mußten bei der Datenauswertung an der Nahtstelle zweier Sessionen Sprünge in allen Stationsuhren zugelassen werden, was durch Unterbrechung der stückweise stetigen Funktionen zur Modellierung des Uhrenverhaltens erreicht werden kann (vgl. Kap. 3.2). Im Falle der CONT02-Daten war dies jeweils um 18 Uhr UTC notwendig.

6.3. VLBI-Lösungen mit der Bernese GPS Software

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Zielparameter, die mit Hilfe der *Bernese GPS Software* für den CONT02-Zeitraum geschätzt wurden, mit unabhängigen Lösungen verglichen. Als Referenzlösungen bieten sich dabei die in enger Zusammenarbeit von FESG und DGFI entstandenen GPS- und VLBI-Lösungen für genau diesen Zeitraum an (vgl. Kap. 4.2.2), auf denen auch die Arbeiten von Thaller (2008) basieren. Zu deren Erzeugung wurden die an der FESG eingesetzte *Bernese GPS Software* (Hugentobler et al., 2001; Dach et al., 2007) und die vom DGFI verwendete VLBI-Software OCCAM (Titov et al., 2001, 2004) im Hinblick auf Modellierung, Implementierung und Parametrisierung bestmöglich abgeglichen.

Da die Parametrisierung durch die Referenzlösungen vorgegeben ist, spielen die Erkenntnisse aus Kap. 3.3 hier nur eine untergeordnete Rolle. Im Vergleich zu Kap. 3.3 zeichnen sich die im folgenden vorgestellten Lösungen im wesentlichen durch eine höhere zeitliche Auflösung der unbekannt Parameter aus. Die troposphärische Verzögerung beispielsweise wurde nicht nur 2-stündig, sondern stündlich geschätzt (vgl. Kap. 3.3.3). Außerdem wurden die zugehörigen a priori-Werte auf der Höhe der benachbarten GPS-Antennen berechnet, um den Vergleich zwischen GPS und VLBI zu erleichtern (vgl. Thaller, 2008; Krügel et al., 2007).

Die EOP, welche für die meisten Lösungen in Kap. 3.3 fixiert wurden, werden nun ebenfalls mitgeschätzt. Für die Nutationswinkel wird jeweils ein Offset samt Änderungsrate für den gesamten CONT02-Zeitraum zugelassen, die ERP dagegen werden mit einer subtäglichen Auflösung von 1 h bestimmt. Da ein vollständiger Satz von EOP einschließlich subtäglicher ERP geschätzt wird, müssen retrograd tägliche Signale in den Polkoordinaten unterdrückt werden (Thaller et al., 2007). Daneben macht das gleichzeitige Schätzen von EOP und Stationskoordinaten das Anbringen einer NNR- und NNT-Bedingung erforderlich (Mendes Cerveira et al., 2007, vgl. Kap. 3.3.2). Für alle acht CONT02-Stationen wird ein Satz von Koordinaten über den gesamten Zeitraum bestimmt.

Entsprechend der VLBI-Lösung des DGFI werden für die einzelnen Eintageslösungen die Daten von 0 bis 24 Uhr UTC verarbeitet (vgl. Thaller et al., 2006, Kap. 6.2). Sofern nicht anders angegeben, werden dabei bereinigte Beobachtungsdaten verwendet (vgl. Kap. 3.3.4). Hierzu wurden wiederum diejenigen Beobachtungen markiert, deren Residuen in einer ersten Lösung einen Wert von mindestens 3 cm (≈ 100 ps) aufgewiesen hatten, um diese in der Folge ignorieren zu können. Der Anteil vernachlässigter Beobachtungen liegt mit ca. 0.8% jedoch deutlich unter der „Ausreißerrate“ aus Kap. 3.3.4, was vor allem mit der deutlich erhöhten Zahl unbekannter Parameter und der damit verbundenen Reduzierung des mittleren Gewichtseinheitsfehlers $\hat{\sigma}_0$ zusammenhängen dürfte.

Einer der wesentlichen Unterschiede gegenüber der OCCAM-Lösung des DGFI dürfte in der Modellierung der Stationsuhr liegen. Während OCCAM das dominierende Verhalten der Stationsuhr innerhalb einer Beobachtungssession als quadratische Funktion modelliert, unterstützt durch eine hochaufgelöste stückweise stetige Funktion zur Erfassung kleinerer Schwankungen (Tesmer, 2004), wird in der *Bernese GPS Software* das gesamte Verhalten durch eine stückweise stetige Funktion erfaßt. Aus diesem Grunde wird an dieser Stelle ein besonderes Augenmerk auf die Auflösung dieser Funktion gelegt. Sofern nicht anders angegeben, wird die Korrektur für die Stationsuhr mit der in Kap. 3.3.3 empfohlenen Auflösung von 6 h geschätzt. Weitere Details zu den Vergleichslösungen können Thaller (2008) entnommen werden.

6.3.1. Troposphäre

Die troposphärische Zenitverzögerung (TZD) wurde mit stündlicher Auflösung geschätzt, wobei die Umrechnung von der jeweiligen Beobachtungs- in die Zenitrichtung mit Hilfe der *Niell (1996) Mapping Functions* erfolgte. Näherungswerte für die Ausgleichung wurden nach dem Modell von Saastamoinen (1973) unter Verwendung einer Standardatmosphäre (Berg, 1948) bestimmt. A priori wurde lediglich der trockene Anteil (abhängig vom Luftdruck) der troposphärischen Verzögerung modelliert, wodurch der Schätzwert den feuchten Anteil (abhängig von Lufttemperatur und relativer Feuchte) sowie die zeitlichen Variationen des trockenen Anteils umfaßt.

Um Vergleiche mit GPS-Zeitreihen zu erleichtern (vgl. Thaller, 2008), wurden auch die a priori-Werte für die VLBI-Lösungen auf Höhe der den VLBI-Teleskopen jeweils benachbarten GPS-Antennen berechnet. Dadurch

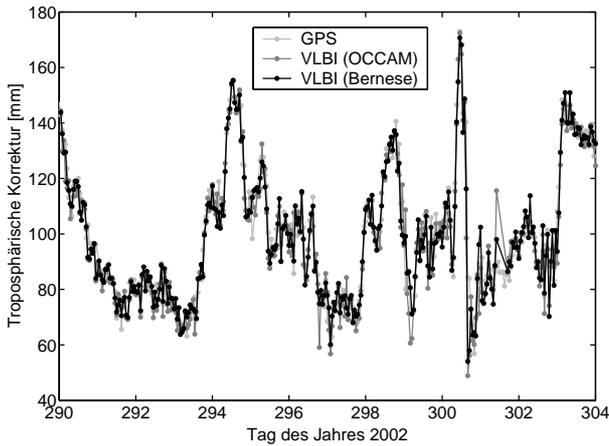


Abb. 6.2.: Korrektur der troposphärischen Verzögerung in Zenitrichtung [mm] gegenüber dem a priori modellierten trockenen Anteil (auf Höhe der GPS-Antenne) für die Station Wettzell in 1-stündiger Auflösung. Vergleich der absoluten Schätzwerte aus der GPS-Lösung (hellgrau) mit denjenigen aus den VLBI-Lösungen mit OCCAM (dunkelgrau) bzw. Bernese (schwarz).

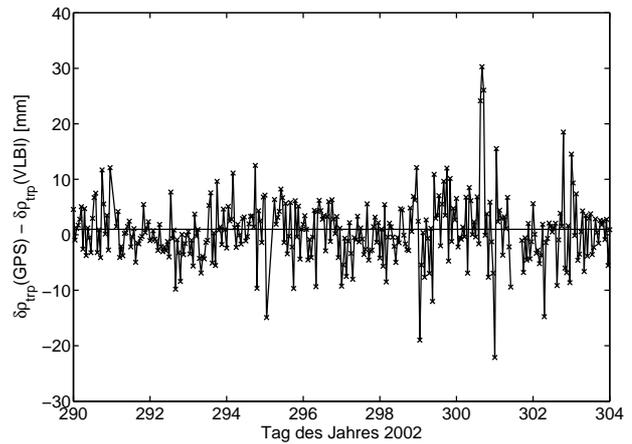


Abb. 6.3.: Differenz [mm] der beiden in Abb. 6.2 dargestellten Bernese-Lösungen (GPS–VLBI) für die Station Wettzell. Die mittlere Differenz beträgt 0.6 mm, was um -0.4 mm von der theoretisch zu erwartenden Differenz aufgrund des Höhenunterschiedes zwischen den Instrumenten (1.0 mm) abweicht. Die Differenzwerte weisen eine Streuung von 5.7 mm auf.

enthalten die TZD-Schätzwerte der VLBI-Lösungen auch die Verzögerung entlang des Höhenunterschiedes zwischen GPS-Antenne und VLBI-Teleskop, und zwar sowohl den feuchten als auch den trockenen Anteil. Daß dabei der komplette trockene Anteil ($\Delta\rho_{\text{trp,d}}(z = 0^\circ) \approx 3$ mm bei einem Höhenunterschied von $\Delta h = 10$ m; Thaller, 2008) mit der entsprechenden feuchten *Niell (1996) Mapping Function* umgerechnet wird, kann aufgrund der geringen Höhendifferenzen vernachlässigt werden. Angemerkt sei hier, daß die Möglichkeit zur Wahl eines beliebigen a priori-Höhenniveaus nicht standardmäßig zur Verfügung steht. Troposphärische Gradienten in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung wurden schließlich als stückweise stetige Funktionen mit einer Auflösung von 24 h geschätzt. Weitere Details zur Troposphärenschätzung können z.B. Krügel et al. (2007) oder Steigenberger et al. (2007) entnommen werden.

Abb. 6.2 zeigt die absoluten TZD-Schätzwerte für die Station Wettzell aus drei verschiedenen Lösungen (VLBI-Lösung der *Bernese GPS Software* im Vergleich zu den beiden Referenzlösungen) für den gesamten CONT02-Zeitraum. Je nach Station schwanken die Werte innerhalb der zwei Wochen um 1–2 dm, wobei die hawaiische Station Kokee Park den größten Änderungen unterworfen ist. Da anhand der Absolutwerte lediglich überprüft werden kann, ob die Lösungen im groben Verlauf übereinstimmen, was sie für alle acht Stationen auch tun, ist es weitaus interessanter, die Differenzen zwischen den Lösungen zu betrachten.

Vergleicht man die beiden Lösungen, die mit Hilfe der *Bernese GPS Software* erzeugt wurden (Abb. 6.3), so ist zu beachten, daß die mittlere Differenz zwischen GPS und VLBI aufgrund des Höhenunterschiedes zwischen den entsprechenden Instrumenten im Idealfall von Null verschieden sein sollte. Im Falle von Wettzell ergibt sich eine mittlere Differenz von 0.6 mm, was um -0.4 mm von der theoretisch zu erwartenden Differenz von etwa 1.0 mm abweicht. Leider sind die Diskrepanzen für die meisten übrigen Stationen größer (s. Abb. 6.4). Der Mittelwert der absoluten Abweichungen von der Soll-Differenz über alle acht Stationen beträgt 2.8 mm (vgl. hierzu auch Kap. 5.3.3).

Die Übereinstimmung zwischen den beiden *Bernese*-Lösungen ist damit etwas schlechter als die Übereinstimmung zwischen der OCCAM- und der GPS-Lösung, wo durchschnittliche Diskrepanzen von 2.3 mm auftreten (vgl. Abb. 6.4). Im Hinblick auf die Kombination der Troposphärenparameter zweier unterschiedlicher Beobachtungstechniken ist aber natürlich vor allem interessant, daß die beiden VLBI-Lösungen nahezu dieselben Diskrepanzen gegenüber den GPS-Resultaten aufweisen. Dies bedeutet, daß die von Thaller (2008) festgestellten TZD-Differenzen kein Problem unterschiedlicher Softwarepakete sein können, da der Vergleich zwischen den beiden *Bernese*-Lösungen sonst kleinere Unterschiede liefern müßte. Vielmehr scheint die Ursache in der Modellierung der unterschiedlichen Meßverfahren begründet zu sein.

Neben dem Mittelwert ist aber natürlich auch die Streuung der Differenzen von Interesse. Die Differenzen zwischen den beiden *Bernese*-Lösungen für die Station Wettzell (Abb. 6.3) weisen eine Streuung von 5.7 mm auf. Ein entsprechender Vergleich der OCCAM- und der GPS-Lösung (ohne Abb.) fällt mit 6.9 mm ein wenig schlechter aus. Im Mittel über alle acht Stationen liegen die beiden VLBI-Lösungen jedoch gleichauf. Die durchschnittliche Streuung gegenüber der GPS-Lösung beträgt in beiden Fällen 6.4 mm.

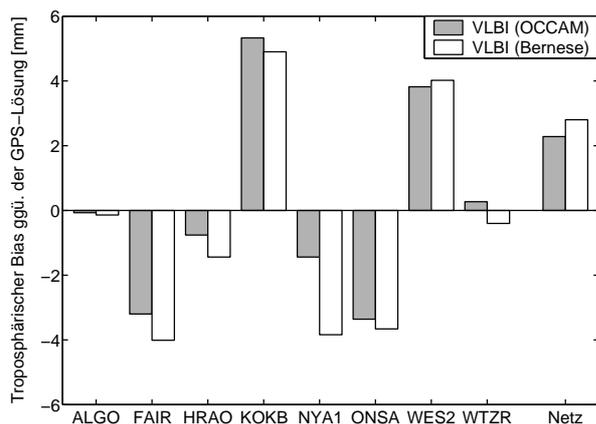


Abb. 6.4.: Mittlerer Versatz (GPS–VLBI) der TZD-Werte [mm] zwischen der GPS-Lösung und den beiden VLBI-Lösungen für alle acht CONT02-Stationen sowie das Mittel absoluter Diskrepanzen für das Gesamtnetz.

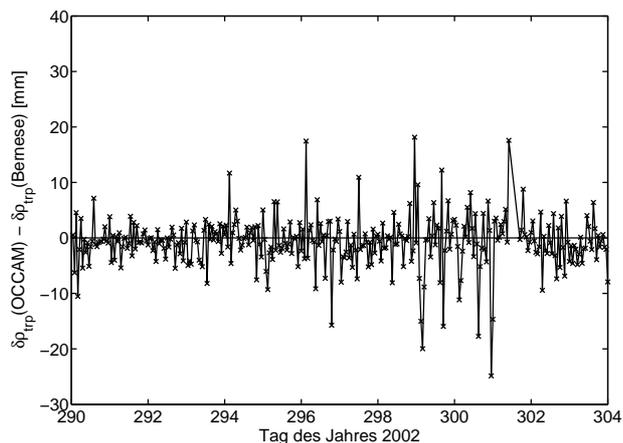


Abb. 6.5.: Differenz [mm] der beiden in Abb. 6.2 dargestellten VLBI-Lösungen (OCCAM–Bernese) für die Station Wetzell. Die mittlere Differenz beträgt -0.7 mm bei einer Streuung von 4.7 mm. Der Maßstab ist identisch zu Abb. 6.3.

Vergleicht man die beiden VLBI-Lösungen direkt miteinander (Abb. 6.5), so sollten sowohl die mittlere Differenz als auch die Streuung möglichst klein sein. Schließlich wurden in beiden Fällen mehr oder weniger dieselben Beobachtungen verarbeitet. Für die Station Wetzell tritt jedoch eine mittlere Differenz von -0.7 mm bei einer Streuung von 4.7 mm auf. Die in Abb. 6.5 dargestellten Differenzen können als beispielhaft für alle CONT02-Stationen betrachtet werden, da die mittlere absolute Abweichung von einer Null-Differenz 0.7 mm beträgt, während die mittlere Streuung für alle acht Stationen bei 4.3 mm liegt. Diskrepanzen ähnlicher Größenordnung konnte Thaller (2008) beim Vergleich der OCCAM-Lösung mit einer Kombinationslösung des IVS feststellen. Damit stimmen die beiden VLBI-Lösungen untereinander immerhin um etwa ein Drittel besser überein als sie es mit der GPS-Lösung tun.

Dennoch sind die verbleibenden Differenzen zwischen den unabhängigen VLBI-Lösungen etwas unbefriedigend. Wünschen würde man sich sicher eine mm-genaue Übereinstimmung. Man sollte jedoch nicht vergessen, daß bei einer stündlichen Auflösung der troposphärischen Verzögerung auch Intervalle auftreten, in denen für eine bestimmte Station nur wenige Beobachtungen vorliegen. Solche Probleme sind insbesondere zu Beginn und Ende einer jeden Beobachtungssession sowie im Falle von Datenlücken (vgl. Kap. 6.1) denkbar. Die Folge sind relativ große formale Fehler für die entsprechenden stationsabhängigen Parameter in diesem Intervall. Es ist wohl davon auszugehen, daß bei einer niedrigeren Auflösung der troposphärischen Refraktion eine etwas bessere Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Lösungen erzielt werden könnte.

Ein gewisser Zusammenhang besteht auch mit der Auflösung der Stationsuhr, wofür Abb. 6.6 ein extremes Beispiel liefert. Der Unterschied der troposphärischen Refraktion in Ny-Ålesund zwischen den beiden VLBI-Lösungen ist für drei aufeinanderfolgende Tage (24.-26. Oktober 2002) und drei verschiedene Auflösungen der Stationsuhr (24, 6 bzw. 2 h) dargestellt. Die in der Abb. angegebenen Zahlenwerte (Mittelwert und Streuung) beziehen sich dabei allein auf den dargestellten Zeitraum. Da die Uhr in diesem mehrere Unstetigkeitsstellen und Driftänderungen aufweist (vgl. Abb. 6.10), kann ihr Verhalten mit wenigen Stützstellen nur ungenügend wiedergegeben werden. Dies führt in diesem speziellen Fall dazu, daß die Streuung der Troposphärendifferenzen bei einer Auflösung von 24 h (zuzüglich Stützstellen an Sessionsgrenzen und Unstetigkeitsstellen) doppelt so hoch ausfällt wie bei einer 2-stündigen Auflösung.

Dies darf man jedoch nicht verallgemeinern. Tab. 6.2 faßt die Auswirkungen verschiedener Veränderungen der Auswertestrategie auf den TZD-Vergleich zusammen. In der ersten Zeile findet sich dabei die Lösung mit 6-stündiger Auflösung der Stationsuhr. Die aufgelisteten Kennzahlen belegen zwar einerseits zweifelsfrei, daß das Uhrverhalten mit einer 24-stündigen Auflösung der Korrekturwerte nicht zufriedenstellend wiedergegeben werden kann, andererseits besteht jedoch kaum ein Unterschied zwischen 6- bzw. 2-stündiger Auflösung. Die Streuung im Vergleich zu OCCAM nimmt bei höherer Auflösung zwar noch ein wenig ab (4.1 mm ggü. 4.3 mm), in ähnlichem Maße nimmt allerdings die Streuung gegenüber der GPS-Lösung zu (6.5 mm ggü. 6.4 mm). Zudem kann in beiden Fällen auch ein leichter Anstieg der mittleren Differenz festgestellt werden.

Alle übrigen in Tab. 6.2 aufgelisteten Manipulationen bedeuten im Prinzip eine Abkehr von der durch die OCCAM- bzw. GPS-Lösung vorgegebenen Parametrisierung. Sollten diese Maßnahmen wider Erwarten dennoch

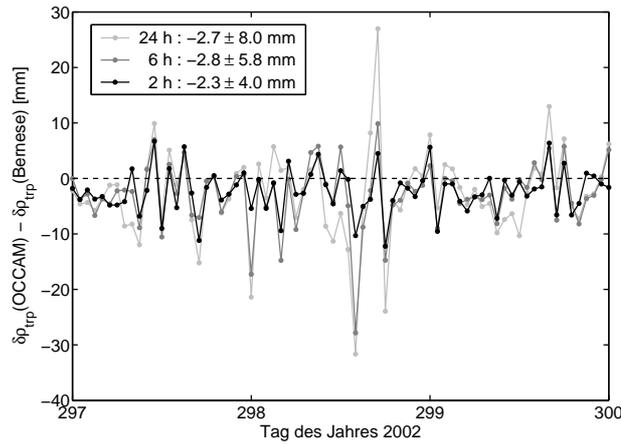


Abb. 6.6.: Differenz [mm] der Troposphärenkorrektur zwischen den beiden VLBI-Lösungen (OCCAM–Bernese) für die Station Ny-Ålesund an drei aufeinanderfolgenden Tagen der CONT02-Kampagne. Die Zahlenwerte geben die mittlere Differenz sowie die Streuung der Differenzwerte für drei unterschiedliche zeitliche Auflösungen (24, 6 bzw. 2 h) der Korrektur der Stationsuhr an.

Tab. 6.2.: Mittlerer Gewichtseinheitsfehler $\hat{\sigma}_0$ und tägliche 3D-Koordinatenwiederholbarkeit verschiedener Lösungen sowie Mittelwerte [mm] von Differenzen $\bar{\Delta}$ und deren Streuung $\bar{\sigma}$ zwischen TZD-Zeitreihen aller acht CONT02-Stationen. Beim „Vergleich mit OCCAM“ handelt es sich um die Differenz zwischen der OCCAM- und der Bernese-Lösung (vgl. Abb. 6.5), beim „Vergleich mit GPS“ um die Abweichung der Differenz von der aufgrund des Höhenunterschieds zwischen den Instrumenten zu erwartenden theoretischen Differenz (vgl. Abb. 6.3). Modellierung bzw. Parametrisierung der Referenzlösung: ERP und TZD stündlich, Stationsuhr 6-stündig, troposphärische Gradienten täglich, Nutation 14-tägig, NNR/NNT-Bedingung für die Koordinaten, „Ausreißerbeobachtungen“ eliminiert.

Veränderung gegenüber der Referenzlösung	$\hat{\sigma}_0$ [mm]	3D-Wh. [mm]	Vergleich mit OCCAM		Vergleich mit GPS	
			$\bar{\Delta}$ [mm]	$\bar{\sigma}$ [mm]	$\bar{\Delta}$ [mm]	$\bar{\sigma}$ [mm]
—	9.86	9.65	0.66	4.33	2.80	6.35
Stationsuhr 24-stündig	11.03	10.64	0.73	5.36	2.75	7.01
Stationsuhr 12-stündig	10.11	10.16	0.67	4.65	2.80	6.45
Stationsuhr 3-stündig	9.52	9.63	0.71	4.16	2.84	6.34
Stationsuhr 2-stündig	9.36	9.58	0.69	4.09	2.85	6.50
ERP täglich	10.04	8.49	0.61	4.35	2.82	6.15
Nutation fixiert	9.67	9.51	0.66	4.32	2.79	6.37
Troposphärische Gradienten fixiert	11.45	10.34	0.60	5.05	2.49	7.06
„Ausreißerbeobachtungen“ mitverwendet	10.69	10.19	0.61	4.37	2.79	6.33

zu einer verbesserten Übereinstimmung mit diesen Vergleichslösungen führen, wäre dies ein Indiz für Probleme mit der Implementierung des entsprechenden Effektes. Im Falle der EOP kann hier aber wohl Entwarnung gegeben werden. Weder eine Reduzierung der ERP-Auflösung von stündlich auf täglich, noch ein Verzicht auf die Schätzung von Nutationskorrekturen haben einen spürbaren Einfluß auf die Troposphärenschätzung, was andererseits auch zeigt, daß TZD und EOP kaum miteinander korreliert sind. Erfreulich ist auch, daß die Mitverwendung vermeintlicher „Ausreißerbeobachtungen“ nahezu unveränderte TZD liefert. Spürbare Korrelationen bestehen dagegen zwischen TZD und horizontalen troposphärischen Gradienten. Eine Vernachlässigung der Gradientenschätzung erhöht die Streuung der TZD-Differenzen im Vergleich zur OCCAM- und GPS-Lösung jeweils um etwa 0.7 mm (vgl. Tab. 6.2).

Einen Vergleich der geschätzten Vektorkomponenten in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung aus den drei unabhängigen Lösungen zeigen die Abb. 6.7 und 6.8. Dabei ist zu beachten, daß zwischen den beiden Bernese-Lösungen auf der einen sowie der OCCAM-Lösung auf der anderen Seite ein Unterschied in der Modellierung besteht. Während die Bernese GPS Software die troposphärischen Gradienten als stückweise stetige Funktionen mit Stützstellen an den Intervallenden (Tagesbeginn und -ende) modelliert, können die Gradienten mit Hilfe von OCCAM lediglich als konstant über das jeweilige Intervall geschätzt werden. Bezugsepoche dieser Werte ist damit die Intervallmitte, im vorliegenden Fall also die Tagesmitte. Besonders deutlich wird dieser Unterschied anhand

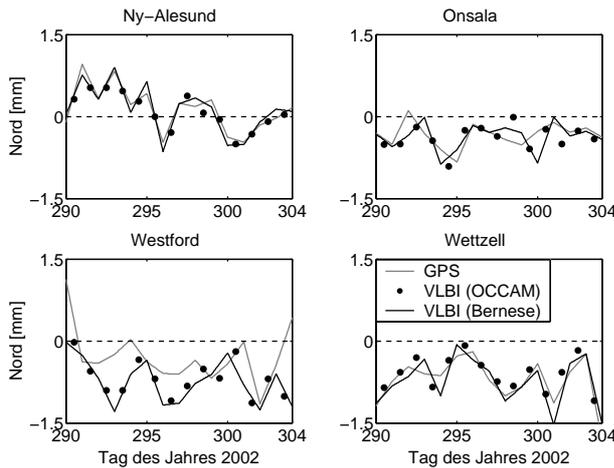


Abb. 6.7.: Tägliche Komponenten des troposphärischen Gradientenvektors in Nord-Süd-Richtung [mm] für vier verschiedene Stationen. Diese wurden mit OCCAM als konstante Offsets über einen Tag modelliert (schwarze Punkte), mit der Bernese GPS Software dagegen als stückweise stetige Funktionen (graue bzw. schwarze Linien).

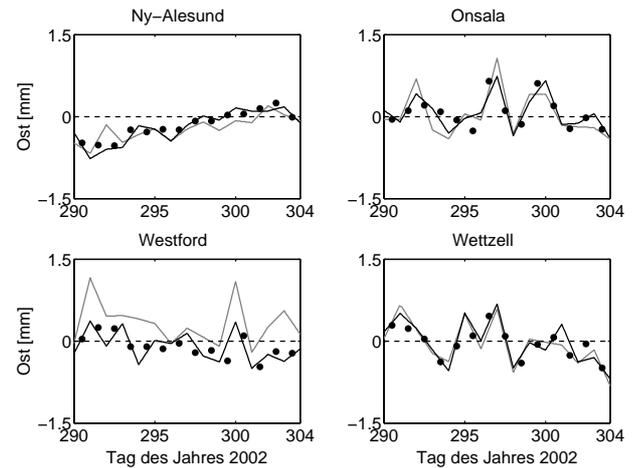


Abb. 6.8.: Tägliche Komponenten des troposphärischen Gradientenvektors in Ost-West-Richtung [mm] für vier verschiedene Stationen. Diese wurden mit OCCAM als konstante Offsets über einen Tag modelliert, mit der Bernese GPS Software dagegen als stückweise stetige Funktionen (Erläuterung der Linienarten s. Abb. 6.7).

der Nord-Süd-Komponente von Ny-Ålesund für die erste Hälfte des CONT02-Zeitraumes (Abb. 6.7). Obwohl hier alle drei Schätzungen hervorragend übereinstimmen, würde sich für die OCCAM-Lösung eine völlig andere Kurve ergeben, wenn man die einzelnen Schätzwerte unberechtigt durch Linien verbinden würde.

Die einzelnen Komponenten der Gradientenvektoren erreichen Werte von maximal ± 1.5 mm. Die Übereinstimmung zwischen den beiden VLBI-Lösungen kann trotz der unterschiedlichen Modellierung mit Sicherheit als gut bezeichnet werden. Die vier in den Abb. 6.7 und 6.8 fehlenden Stationen verhalten sich ähnlich wie die abgebildeten. Der Vergleich der beiden *Bernese*-Lösungen zeigt für wenige Stationen einen Versatz zwischen den Kurven, z.B. in beiden Komponenten der Station Westford. Wie Krügel et al. (2007) zeigen konnten, kann ein solcher Versatz u.U. durch Korrelationen mit anderen Parametern hervorgerufen werden.

6.3.2. Stationsuhren

Die Korrekturwerte für die Stationsuhren sind in aller Regel nicht von besonderem Interesse. Im Prinzip könnten sie daher ähnlich wie z.B. die GNSS-Phasenmehrdeutigkeiten bereits vor dem Lösen des Normalgleichungssystems aus diesem eliminiert werden, ohne dabei den Einfluß auf die übrigen Parameter zu verlieren. Aufgrund der in Kap. 6.2 angesprochenen Problematik an den Sessionsgrenzen sowie aufgrund des möglichen Defizits in der für diese Arbeit genutzten Modellierung, werden im folgenden einige Stationsuhren etwas genauer betrachtet. Mit Blick auf eine zukünftige Kombination von VLBI und GNSS könnte sich an den Stationen, wo VLBI-Teleskop und GNSS-Antenne mit derselben Uhr verbunden sind, außerdem eine zusätzliche Verknüpfungsmöglichkeit ergeben.

Wie bereits erwähnt, wird das Verhalten der Stationsuhren (bezüglich einer Referenzuhr) von OCCAM jeweils als quadratische Funktion über die gesamte Beobachtungssession modelliert, im Falle von Uhrensprüngen reduziert auf entsprechende Intervalle mit stetigen Funktionswerten. Abweichungen vom quadratischen Verlauf können von einer zusätzlichen stückweise stetigen Funktion mit üblicherweise stündlicher Auflösung (Tesmer, 2004) aufgefangen werden. Da der Hauptanteil des Uhrenverhaltens bereits durch die quadratische Funktion abgedeckt wird, kann (und muß) auf die stetige Funktion ein verhältnismäßig starker Zwang ausgeübt werden, um eine stabile Lösung zu erhalten.

Im Gegensatz dazu wurde bei der Erstellung dieser Arbeit versucht, das Verhalten der VLBI-Uhren einzig und allein durch eine stückweise stetige Funktion mit variabler zeitlicher Auflösung zu modellieren, da derartige Parameter bereits implementiert waren. Wie Abb. 6.6 und Tab. 6.2 bereits zeigen konnten, kann eine tägliche Auflösung der Uhrparameter keine zufriedenstellenden Resultate liefern. Eine solche würde, abgesehen von einem Sprung an der Sessionsgrenze um 18 Uhr UTC, einem linearen Verhalten über einen Tag entsprechen.

Abb. 6.9 zeigt die Uhrkorrekturen bezüglich der Referenzuhr in Algonquin Park für drei zufällig ausgewählte Stationen bei täglicher Auflösung für den gesamten CONT02-Zeitraum. Die Stützstellen der Polygone sind dabei durch schwarze Punkte hervorgehoben. Da die Uhrparameter bislang nicht vom Programm ADDNEQ2 verarbeitet

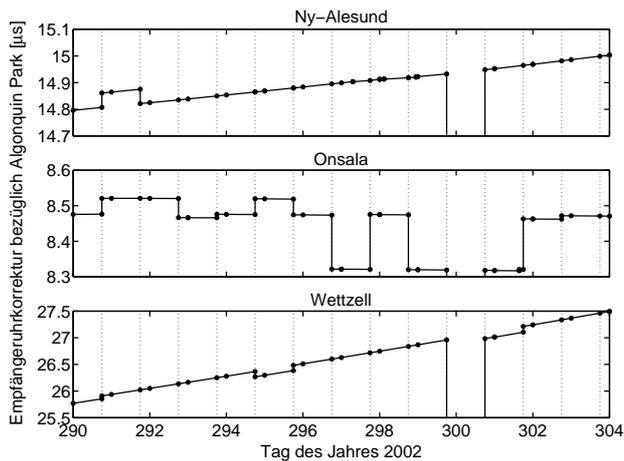


Abb. 6.9.: Korrekturen der Stationsuhr [μs] bezüglich Algonquin Park über den gesamten CONT02-Zeitraum für drei verschiedene Stationen. Die Auflösung beträgt 24 h, die Sessionsgrenzen um 18 Uhr (vertikale Linien) machen jedoch zusätzliche Stützstellen erforderlich (vgl. Tab. 3.5). Ergänzende Sprünge wurden für Ny-Ålesund (Tag 297, 298) und Onsala (301) zugelassen.

werden können, stammen die Schätzwerte aus unabhängigen Eintageslösungen. Daß an den *Tagesgrenzen* in Abb. 6.9 mit bloßem Auge keine Unstetigkeiten zu erkennen sind, kann als positives Indiz für die Konsistenz dieser Lösungen gewertet werden. In erster Näherung zeigen alle drei Uhren ein lineares Verhalten. Da die Drift jedoch sehr unterschiedlich ausfällt, sind die Sprünge an den *Sessionsgrenzen* (vertikale Linien) nicht in allen Zeitreihen gleich gut sichtbar. Am deutlichsten zeigen sich diese in der Zeitreihe für Onsala, welche die geringste Drift aufweist.

Ursache solcher Sprünge kann die Verwendung unterschiedlicher Uhrenmodelle an den verschiedenen Korrelatoren sein (vgl. Kap. 6.2). Zeigt sich in den Zeitreihen aller Uhren übereinstimmend ein Sprung, kann dieser jedoch auch auf Probleme mit der Referenzuhr hindeuten. Während der Beobachtungssession von Tag 299 auf Tag 300 mußte die Station Algonquin Park beispielsweise einen Ausfall verkraften (vgl. Kap. 6.1). Da daher keine Beobachtungen vorliegen können, werden zwar einige der Uhrparameter bezüglich dieser Station singulär, die übrigen werden jedoch relativ zueinander korrekt geschätzt. Vernünftiger wäre natürlich die Wahl einer permanent verfügbaren Referenzuhr, die Zahl nicht singulärer Uhrparameter wäre jedoch identisch. Schließlich könnten in jenem Fall dann für Algonquin Park mangels Beobachtungen keine Korrekturen ermittelt werden. Auch auf die übrigen geschätzten Parameter hat die Wahl der Referenzuhr praktisch kaum einen Einfluß.

Das Verhalten der Uhr wird deutlicher, wenn der dominierende lineare Trend entfernt wird. Die oberste Kurve in Abb. 6.10 entspricht den Uhrkorrekturen aus Abb. 6.9 für die Station Ny-Ålesund nach Abzug eines Trends von 14.84 ns/d . Die Intervalle mit Sprüngen sind zur Vereinfachung ausgespart. Deutlich zu erkennen ist ein unregelmäßiges Verhalten verbunden mit mehreren Driftänderungen an den Tagen 297–301, das u.a. zu Problemen bei der Schätzung von Troposphärenparametern führt (vgl. Abb. 6.6). Erhöht man die Auflösung für die Uhrparameter (in Abb. 6.10 versetzt dargestellt), so werden zunehmend mehr hochfrequente Anteile sichtbar. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Signalanteile tatsächlich durch die Uhr verursacht werden, und welche auf Korrelationen mit anderen unbekanntem Parametern zurückzuführen sind.

Nimmt man die Vergleichslösungen (OCCAM- bzw. GPS-Lösung) zum Maßstab, so läßt sich anhand von Tab. 6.2 bei einer Verbesserung der Auflösung von 24 auf 6 h auch eine relativ deutlich verbesserte Übereinstimmung für die Troposphärenparameter feststellen. Beim Übergang auf eine 2-stündige Auflösung muß hingegen wieder eine leichte Verschlechterung in Kauf genommen werden (vgl. Kap. 6.3.1). Dies zeigt, daß die Auflösung der Uhrparameter nicht beliebig gesteigert werden kann. Auch entsprechende Vergleiche für die ERP deuten an, daß das Optimum im Bereich zwischen 6 und 3 h zu liegen scheint (vgl. Abb. 6.14 und Kap. 6.3.3). Problem der stückweise stetigen Funktion scheint also zu sein, daß zwar einerseits eine hohe Auflösung erforderlich wäre, um das (u.U. quadratische) Verhalten der Stationsuhr bestmöglich approximieren zu können, daß damit andererseits ab einem gewissen Punkt aber eine Überparametrisierung einhergeht. Im Falle von OCCAM wird dagegen der dominierende Anteil der Uhrkorrektur mit den wenigen Parametern einer quadratischen Funktion modelliert, während Zwangsbedingungen für die zusätzliche hochaufgelöste stückweise stetige Funktion die negativen Aus-

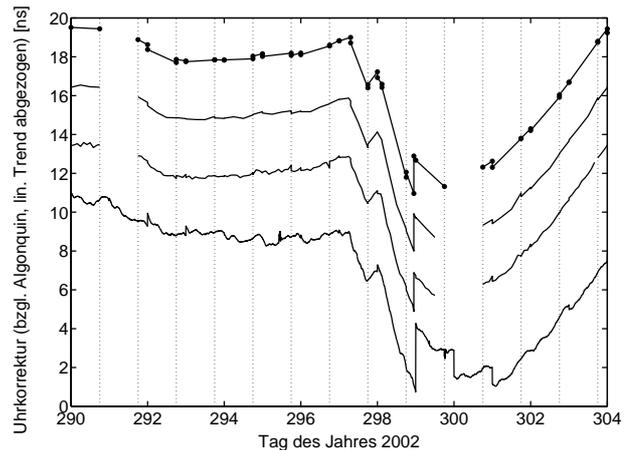


Abb. 6.10.: Korrekturen der Stationsuhr [ns] bezüglich Algonquin Park nach Abzug eines linearen Trends von 14.84 ns/d für die Station Ny-Ålesund. Folgende Kurven sind mit unterschiedlichem Offset aufgetragen (von oben nach unten): VLBI-Lösungen mit Auflösungen von 24, 6 bzw. 2 h sowie eine GPS-Lösung mittels PPP (vgl. Zumberge et al., 1997). An den Lücken in den VLBI-Lösungen traten größere Sprünge auf.

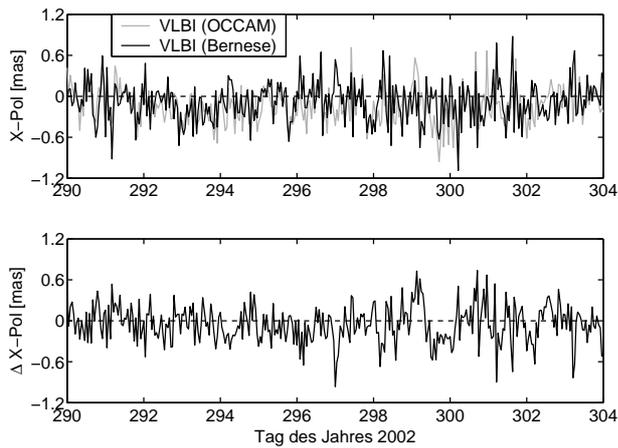


Abb. 6.11.: Vergleich stündlicher Schätzwerte für den X-Pol [mas] aus VLBI-Lösungen bei Unterdrückung retrograd täglicher Signale. Oben: Differenzen gegenüber IERS C04 (OCCAM: $\bar{x}_P = -0.14 \pm 0.25$ mas; Bernese GPS Software: $\bar{x}_P = -0.08 \pm 0.29$ mas); unten: Differenz (OCCAM–Bernese) $\Delta\bar{x}_P = -0.05 \pm 0.27$ mas. Die Zahlenwerte geben jeweils Mittelwert und Streuung an.

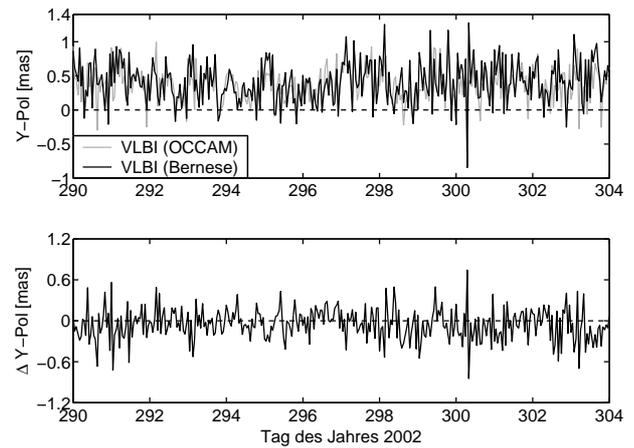


Abb. 6.12.: Vergleich stündlicher Schätzwerte für den Y-Pol [mas] aus VLBI-Lösungen bei Unterdrückung retrograd täglicher Signale. Oben: Differenzen gegenüber IERS C04 (OCCAM: $\bar{y}_P = +0.35 \pm 0.25$ mas; Bernese GPS Software: $\bar{y}_P = +0.41 \pm 0.30$ mas); unten: Differenz (OCCAM–Bernese) $\Delta\bar{y}_P = -0.05 \pm 0.23$ mas. Die Zahlenwerte geben jeweils Mittelwert und Streuung an.

wirkungen von Korrelationen verhindern. Da die entsprechende Funktion innerhalb der *Bernese GPS Software* die vollständige Korrektur aufnehmen muß, ist ein Anbringen von Zwangsbedingungen hier nicht möglich.

Interessant ist schließlich noch, ob GNSS- und VLBI-Uhrensätzungen möglicherweise kombiniert werden könnten. Grundvoraussetzung hierfür ist, daß die entsprechenden Instrumente ihre Zeit vom selben Frequenznormal beziehen. Da dies sowohl in Algonquin Park als auch in Ny-Ålesund gegeben ist, sollte eine Differenz der beiden GPS-Empfängeruhrkorrekturen eine der VLBI-Schätzung vergleichbare Kurve liefern. Die in Abb. 6.10 unten dargestellten Korrekturen sind das Resultat zweier PPP-Lösungen für die betreffenden Stationen (vgl. Zumberge et al., 1997). Abgesehen von teilweise unterschiedlichen Sprüngen erscheint die Übereinstimmung mit den VLBI-Schätzungen recht ermutigend. Insbesondere die Drift stimmt über weite Teile gut überein.

Neben Stationskoordinaten, EOP und Troposphärenparametern könnten also die Stationsuhren u.U. eine vierte Möglichkeit zur Kombination der GNSS mit VLBI bieten. Hierzu müßte man jedoch auch alle instrumentellen Verzögerungen bis auf wenige ps im Griff haben bzw. mitbestimmen. Allein auf Seiten der GNSS wird die Uhrensätzung z.B. durch Verzögerungen zwischen Code- und Phasenbeobachtungen sowie zwischen unterschiedlichen Frequenzen erschwert (z.B. Liu et al., 2004; Bruyninx et al., 1999).

6.3.3. Erdorientierungsparameter

Da VLBI als einziges der geodätischen Raumverfahren in der Lage ist, einen vollständigen Satz von EOP zu bestimmen, sollte nach der Implementierung der VLBI-Verarbeitung auch die *Bernese GPS Software* dazu in der Lage sein. In den einzelnen Eintageslösungen für den CONT02-Zeitraum wurden zunächst alle EOP stündlich aufgesetzt, die Auflösung für die Nutationswinkel wurde später mit Hilfe des Programms ADDNEQ2 jedoch auf 2 Wochen reduziert. Da die subtägliche Auflösung für die ERP beibehalten wurde, müssen retrograd tägliche Signale in den Polkoordinaten unterdrückt werden, da diese stark mit den Nutationswinkeln korreliert sind (Hefty et al., 2000; Thaller et al., 2007; Thaller, 2008). Entsprechende Zusatzbedingungen werden für jede einzelne Eintageslösung mit Hilfe der Unterprogramme ADWEIGHT und BLOCKRET angebracht. Beim Übergang von GPSEST auf ADDNEQ2 wird daneben die Darstellung der EOP verändert. Parameter, die in Form von Offset und Drift am Beginn jedes Intervalls vorliegen, werden transformiert in eine kontinuierliche Polygondarstellung mit Offsetwerten an den Intervallgrenzen (Dach et al., 2007).

Verglichen werden im folgenden nur die beiden VLBI-Lösungen, d.h. die OCCAM-Lösung des DGFI und die neue VLBI-Lösung der *Bernese GPS Software*. Für EOP-Vergleiche zwischen GPS und VLBI sei auf Thaller (2008) verwiesen. Die Abb. 6.11 und 6.12 zeigen in der oberen Hälfte jeweils die stündlichen Schätzwerte gegenüber der a priori angebrachten C04-Lösung (Gambis, 2004) für die beiden Polkoordinaten. Die Mittelwerte der Zeitreihen stimmen verhältnismäßig gut überein, was sich insbesondere in einem konsistenten Versatz des Y-Pols äußert. Die mit der *Bernese GPS Software* erzeugten Zeitreihen weisen im Vergleich zur OCCAM-Lösung jedoch ein um

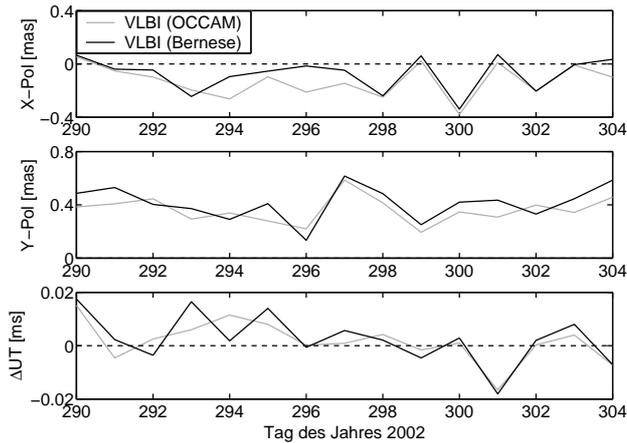


Abb. 6.13.: Vergleich täglicher ERP-Werte (Polkoordinaten X, Y ; ΔUT) aus zwei verschiedenen VLBI-Lösungen (grau: OCCAM, schwarz: Bernese GPS Software).

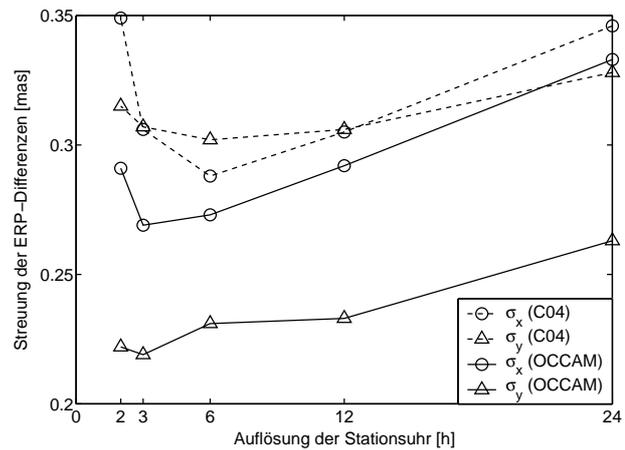


Abb. 6.14.: Streuung der Differenzen [mas] zwischen den mit Hilfe der Bernese GPS Software geschätzten Polkoordinaten und der C04-Reihe des IERS (vgl. z.B. Abb. 6.11 oben) bzw. der OCCAM-Lösung (vgl. z.B. Abb. 6.11 unten), jeweils in Abhängigkeit der Auflösung der Korrektur für die Stationsuhr.

ca. 15% gesteigertes „Rauschen“ auf. Dabei könnte es sich theoretisch zwar auch um tatsächliche Signalanteile handeln, es ist aber wohl eher vom Gegenteil auszugehen.

Betrachtet man die Differenzen zwischen den verschiedenen Zeitreihen (OCCAM–Bernese, Abb. 6.11 und 6.12 unten), so kann als positiv bewertet werden, daß der Mittelwert der Differenzen mit -0.05 mas in beiden Fällen sehr nahe bei Null liegt. Enttäuschend ist jedoch, daß die Differenzen eine ähnliche Größenordnung aufweisen wie die Originalsignale. Dies zeigt sich in einer Streuung der Differenzen um den Mittelwert, die mit 0.27 (X -Pol) bzw. 0.23 mas (Y -Pol) etwa lediglich das Niveau der ursprünglichen OCCAM-Lösung erreicht. Im ersten Fall ist die Streuung der Differenzen sogar etwas größer als diejenige der mit OCCAM bestimmten Ausgangswerte.

Ähnlich wie bei den Troposphärenparametern könnte eine mögliche Erklärung für die auftretenden Diskrepanzen darin liegen, daß eine stündliche Auflösung für die ERP bei der verhältnismäßig geringen Anzahl an Beobachtungen eventuell ein wenig zu ambitioniert ist. Ein Vergleich täglicher Schätzwerte (s. Abb. 6.13) liefert denn auch eine weitaus befriedigendere Übereinstimmung. Darüberhinaus zeigt sich auch für die ERP ein Zusammenhang mit der Modellierung der Stationsuhren, die für alle bisherigen ERP-Vergleiche mit einer Auflösung von 6 h bestimmt wurden. Trägt man die Streuung der Differenzen gegenüber C04 bzw. gegenüber der OCCAM-Lösung in Abhängigkeit der Auflösung der Stationsuhren auf (s. Abb. 6.14), so zeigt sich, daß die beste Übereinstimmung wohl wenig unterhalb von 6 h erzielbar wäre. Bei einer zu niedrigen Auflösung der Uhrparameter dürfte sich ein Teil der verbliebenen Uhrfehler in den ERP wiederfinden, bei einer zu hohen Auflösung scheinen ERP-Signalanteile an die Uhrparameter „verlorenzugehen“. Interessant ist daneben, daß eine Mitverwendung der vermeintlichen „Ausreißerbeobachtungen“ zu einer leichten Verbesserung der Übereinstimmung mit OCCAM führt, was auch hier auf Defizite hinweist.

Beim Vergleich der Zeitreihen für ΔUT (s. Abb. 6.15) fällt das Fazit etwas positiver aus als bei den Polkoordinaten. Zwar zeigen auch hier die Schätzwerte der Bernese-Lösung eine etwas größere Streuung als die OCCAM-Werte, die Streuung der Differenzen liegt mit 0.011 ms in diesem Fall jedoch relativ deutlich darunter. Dies könnte allerdings auch daran liegen, daß das (nicht durch die Ozeangezeiten verursachte) subtägliche Signal von ΔUT stärker ist als dasjenige der Polkoordinaten und daher leichter eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Softwarepaketen zu erzielen ist. Der Vergleich täglicher ERP (Abb. 6.13) zeigt jedenfalls keinen nennenswerten Unterschied zwischen den Polkoordinaten und ΔUT .

Die ERP-Vergleiche liefern im Gegensatz zu den Troposphärenvergleichen (vgl. Kap. 6.3.1) insgesamt relativ ermutigende Resultate. Zu einem guten Teil liegt dies jedoch daran, daß die subtäglichen ERP-Werte (vgl. z.B. Abb. 6.11) nur wenig oberhalb der Meßgenauigkeit liegen. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die TZD-Werte (vgl. Abb. 6.2) um mindestens eine Größenordnung vom Meßrauschen. Es kann jedoch festgehalten werden, daß die ERP-Differenzen zwischen OCCAM und Bernese zumindest in allen Fällen kleiner sind als die mit der Bernese GPS Software geschätzten Absolutwerte. Außerdem sind der konsistente Versatz im Y -Pol von ca. 0.4 mas (Abb. 6.12) sowie die gute Übereinstimmung der täglichen ERP (Abb. 6.13) positive Indizien für die Plausibilität der Bernese-Ergebnisse. Und mit der Modellierung der Stationsuhr (Abb. 6.14) konnte bereits ein Ansatzpunkt für eine weitere Verbesserung lokalisiert werden.

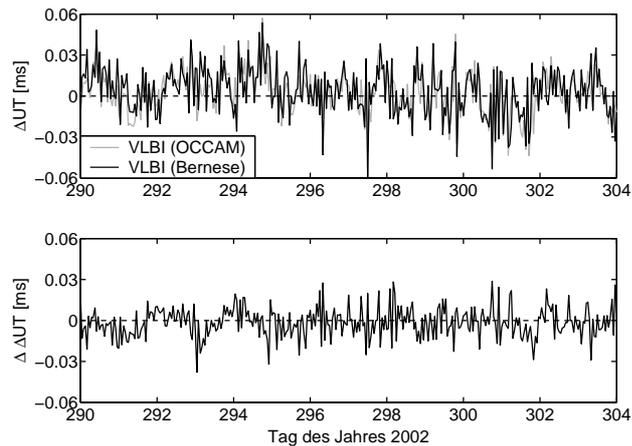


Abb. 6.15.: Vergleich stündlicher Schätzwerte für $\Delta UT = UT1 - UTC$ [ms] aus zwei verschiedenen VLBI-Lösungen. Oben: Differenzen gegenüber IERS C04 (OCCAM: $\Delta \overline{UT} = +0.002 \pm 0.015$ ms; Bernese GPS Software: $\Delta \overline{UT} = +0.004 \pm 0.017$ ms); unten: Differenz (OCCAM - Bernese) $\Delta \Delta \overline{UT} = -0.001 \pm 0.011$ ms. Die Zahlenwerte geben jeweils Mittelwert und Streuung an.

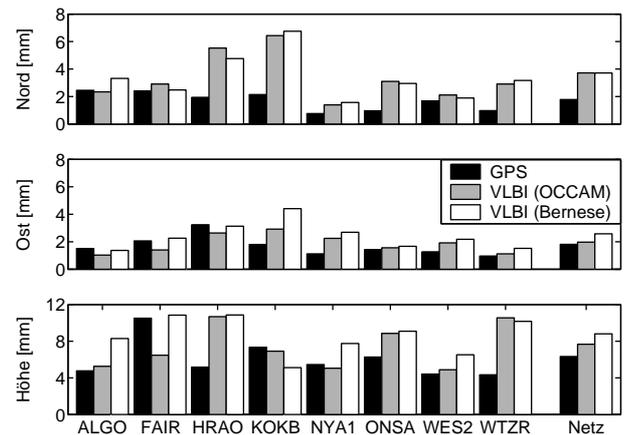


Abb. 6.16.: Wiederholbarkeit der Koordinaten [mm] in den 14 einzelnen Tageslösungen für alle acht CONT02-Stationen sowie Mittelwerte für das Stationsnetz (GPS-Mittel nur für die 8 dargestellten Stationen, unterschiedlicher Maßstab für Lage und Höhe). Bei den Stationsbezeichnungen handelt es sich um die Namen der IGS-Stationen (vgl. Tab. 6.1).

6.3.4. Stationskoordinaten

Für jede einzelne Station wurde ein Satz von Koordinaten für den gesamten CONT02-Zeitraum geschätzt. Die Lagerung des Stationsnetzes erfolgte dabei mit Hilfe einer NNR/NNT-Bedingung. Abb. 6.16 zeigt die tägliche Wiederholbarkeit der Koordinaten in den drei Raumrichtungen für alle acht Stationen sowie den jeweiligen Mittelwert. Die OCCAM-Lösung weist dabei in allen drei Komponenten eine schlechtere Wiederholbarkeit auf als die GPS-Lösung. Besonders gravierend ist der Unterschied jedoch in Nordrichtung, was mit der mangelnden Verfügbarkeit von VLBI-Stationen auf der Südhalbkugel zusammenhängt (vgl. Abb. 6.1; Thaller, 2008). Die VLBI-Lösung der *Bernese GPS Software* wiederum zeigt mit mittleren Wiederholbarkeiten von 3.7, 2.6 bzw. 8.8 mm leichte Nachteile im Vergleich zur OCCAM-Lösung. Diese Unterschiede sind Ausdruck eines leicht schlechteren Genauigkeitsniveaus der *Bernese*-Lösungen, das sich auch bereits anhand der Vergleiche der mittleren Gewichtseinheitsfehler in Kap. 3.3 gezeigt hat.

Mittlere 3D-Wiederholbarkeiten sind auch in Tab. 6.2 enthalten. Vergleicht man verschiedene Auflösungen für die Stationsuhr, so zeigt sich bei einer Verringerung der Auflösung eine relativ deutliche Verschlechterung von bis zu 1 mm gegenüber der Referenzlösung mit 6-stündigen Uhrparametern. Eine Erhöhung der Auflösung auf 3 bzw. 2 h bringt dagegen keine nennenswerte Verbesserung mehr. Während sich eine Fixierung der troposphärischen Gradienten sowie eine Mitverwendung vermeintlicher „Ausreißerbeobachtungen“ wie erwartet negativ auf die Koordinatenwiederholbarkeit auswirken, können tägliche ERP für eine relativ deutliche Verbesserung sorgen. Dies bestätigt im Prinzip die Aussagen aus Kap. 6.3.3, wonach VLBI mit seinen verhältnismäßig wenigen Beobachtungen mit stündlichen ERP ein wenig überfordert zu sein scheint. Im Hinblick auf eine Kombination mit den GNSS machen hochaufgelöste ERP jedoch auch für VLBI-Auswertungen sehr wohl Sinn.

6.3.5. ΔUT aus INT2-Messungen

Die etwa einstündigen INT2-Meßkampagnen dienen einzig und allein der Bestimmung von ΔUT (vgl. Kap. 3.3.5). Bis auf Uhrparameter (Offset und Drift für eine der beiden Stationsuhren) und TZD (je eine Konstante für beide Stationen) werden alle übrigen Parameter festgehalten. Abb. 6.17 enthält die Resultate der bereits in Kap. 3.3.5 vorgestellten Lösungen. Diese scheinen relativ gut mit den in Fischer et al. (2003) gezeigten Ergebnissen übereinzustimmen, auch hinsichtlich der Genauigkeit für ΔUT . Fischer et al. (2003) nutzten für ihre Berechnungen das Programmpaket CALC/SOLVE (Gordon, 2004).

Dieselbe Software wird auch vom BKG für Routine-Auswertungen der *Intensive*-Messungen eingesetzt. Die Lösung *bk gint05*, die aufgrund der verwendeten Modelle (Nutationsmodell MHB2000, terrestrischer Referenzrahmen VTRF2003, *Niell (1996) Mapping Functions*) der *Bernese*-Lösung am nächsten kommen sollte, ist zum Vergleich ebenfalls in Abb. 6.17 dargestellt. Im Gegensatz zur CALC/SOLVE-Lösung von Fischer et al. (2003)

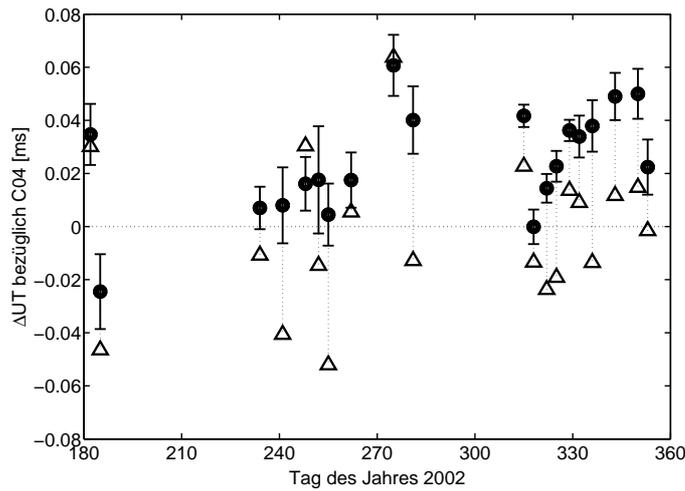


Abb. 6.17.: ΔUT -Schätzwerte [ms] im Vergleich zu C04 für die INT2-Kampagnen des Jahres 2002. Bernese-Resultate (Kreise) im Vergleich zur BKG-Lösung `bkgint05` (Dreiecke).

ist hier jedoch praktisch kaum eine Übereinstimmung zu erkennen, was mit den fixierten Modellen zusammenhängen dürfte. Während das Nutationsmodell MHB2000 (Mathews et al., 2002) mit dem von der *Bernese GPS Software* verwendeten Modell IAU2000 übereinstimmen dürfte, bestehen wohl Unterschiede in der Realisierung des erd- bzw. raumfesten Systems. Die in der BKG-Lösung fixierten Quasarkoordinaten stammen aus einer vorangegangenen BKG-Lösung, die Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten aus dem Referenzrahmen VTRF2003 (Nothnagel, 2003). Nicht erklärt werden können die großen Differenzen hingegen durch die Wahl des subtäglichen Polmodells.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte die Prozessierung von VLBI-Daten erfolgreich in die *Bernese GPS Software*, ein weltweit verbreitetes GNSS-Auswerteprogramm, integriert werden. Verarbeitet werden können bislang allerdings nur die sog. Gruppenlaufzeiten (*group delays*), und Ausgangspunkt der Prozessierung sind nicht die rohen Korrelatorergebnisse, sondern bereits vorverarbeitete VLBI-Daten im *NGS card format*. Unter diese Vorverarbeitung fallen das Korrigieren von Uhrensprüngen, das Lösen von Mehrdeutigkeiten, die Elimination von Ausreißern sowie die Berechnung der ionosphärischen Korrektur. Die beiden im Hinblick auf den Beobachtungstyp und das Ausgangsformat angeführten Einschränkungen gelten in dieser Form jedoch für die meisten VLBI-Softwarepakete.

Mit Hilfe der *Bernese GPS Software* gelingt sowohl die Prozessierung von ganztägigen VLBI-Beobachtungen ausgedehnter globaler Stationsnetze als auch die Verarbeitung einstündiger Messungen auf einer einzelnen Basislinie. Unter Einbeziehung aller Beobachtungen ergibt sich aus der vermittelnden Ausgleichung ein mittlerer Gewichtseinheitsfehler von ca. 40 ps. Werden diejenigen Beobachtungen mit den größten Verbesserungen außer Acht gelassen, kann mit ca. 30 ps ein Wert erreicht werden, der typisch ist für die Auswertung von Gruppenlaufzeiten.

Das größte Defizit der Implementierung dürfte die vereinfachte Modellierung der Stationsuhren sein. Um den (u.U. quadratischen) Gang dieser Uhren bestmöglich durch stückweise stetige Funktionen zu approximieren, müssen letztere so hoch aufgelöst werden, daß sich die Uhrkorrekturen nicht mehr sauber von anderen hochaufgelösten Parametern (ERP, Troposphäre) trennen lassen. Hier sollte für die Zukunft ein quadratischer Uhrkorrekturterm vorgesehen werden, wie er bei der VLBI-Verarbeitung üblich ist. Sobald Daten über längere Zeiträume verarbeitet werden, möchte man u.U. auch weitere Parameter als Unbekannte schätzen können, die bislang nicht implementiert wurden. Zu diesen zählen mit Sicherheit die Quasarkoordinaten und evtl. auch die Achsenoffsets.

Was die Modellierung betrifft, können einige VLBI-spezifische Effekte wie die thermische oder gravitationsbedingte Teleskopdeformation sowie die Quellenstruktur bislang nicht berücksichtigt werden. Daneben stehen Modelländerungen bzw. -verbesserungen an, die für die GNSS-Verarbeitung ebenfalls benötigt werden, wodurch sich Synergieeffekte erzielen lassen. Darunter fallen z.B. die Implementierung der neuen Darstellung für Präzession und Nutation der *IERS Conventions 2003* (McCarthy und Petit, 2004) sowie verbesserter *mapping functions* für die troposphärische Refraktion oder die Berücksichtigung der Atmosphärenauflast. Einige der bislang ungenutzten Daten des *NGS card format* (z.B. formaler Fehler des *group delay*, Korrelationskoeffizient, Kabelkalibrierung, meteorologische Parameter) könnten u.U. von einem erweiterten *Bernese*-Format aufgenommen werden.

Angemerkt werden sollte auch, daß die Software-Modifikationen an einer inzwischen ca. 4 Jahre alten erweiterten Version der *Bernese GPS Software*, *Version 5.0* (Dach et al., 2007) vorgenommen wurden. Hier ist also zunächst die Verschmelzung mit einer aktuellen Software-Version erforderlich. Um darüberhinaus die Fähigkeit zur Verarbeitung von VLBI-Daten zu erhalten, müssen die VLBI-relevanten Programmteile im Hinblick auf mögliche Formatänderungen etc. auch weiterhin unterhalten werden. Bevor die Software im Routinebetrieb eingesetzt werden könnte, müßten auch noch einige Schritte automatisiert werden. Hierzu zählen z.B. die Verwaltung der Quasarkoordinaten, das Verschmelzen der Beobachtungsdaten aufeinanderfolgender VLBI-Sessionen, die Aussortierung von Beobachtungen mit großen Verbesserungen oder die Detektion möglicher weiterer Uhrensprünge.

Trotz der zahlreichen genannten Möglichkeiten zur Optimierung und Verbesserung zeigen die VLBI-Resultate der *Bernese GPS Software* bereits eine gute Übereinstimmung mit unabhängigen Schätzungen anderer VLBI-Softwarepakete und auch mit den Resultaten unabhängiger Raumverfahren. Dies konnte anhand der Daten der kontinuierlichen VLBI-Kampagne CONT02 belegt werden, für welche unabhängige GPS- (berechnet mit der *Bernese GPS Software*) und VLBI-Lösungen (OCCAM) zur Verfügung standen (Thaller, 2008). Besonders gut stimmen dabei die Troposphärenparameter überein. Sowohl bei den Verzögerungen in Zenitrichtung (TZD) als auch bei den horizontalen Gradienten liegen die verbliebenen Diskrepanzen zwischen den unterschiedlichen Lösungen deutlich unterhalb des geschätzten Troposphärensignals. Erwartungsgemäß stimmen die beiden VLBI-Lösungen, für welche dieselben Daten verwendet wurden, etwas besser überein als die mit derselben Software erzeugten GPS- und VLBI-Lösungen. Im ersten Fall liegt die mittlere Differenz für die TZD-Werte bei etwa 5 mm. Eine wichtige Erkenntnis ist die, daß die von Thaller (2008) registrierten stationsabhängigen systematischen Differenzen in der Zenitverzögerung kein Problem unterschiedlicher Softwarepakete sind, sondern mit der Modellierung der unterschiedlichen Raumverfahren zusammenhängen müssen.

Etwas schlechter fällt dagegen der ERP-Vergleich zwischen den beiden unabhängigen VLBI-Lösungen aus. Während tägliche Schätzwerte eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung zeigen, weisen sub tägliche Schätzwerte für die Polkoordinaten sowie für ΔUT Differenzen auf, die kaum kleiner sind als das eigentliche Signal. Da das sub tägliche ERP-Signal nur wenig oberhalb der Meßgenauigkeit liegt, stößt man hinsichtlich der Auflösung offensichtlich an Grenzen, sofern nicht zusätzliche Zwangsbedingungen für die Parameter eingeführt werden. Im vorliegenden Fall dürften vor allem Korrelationen mit den ungünstig modellierten Stationsuhren zu Problemen führen. Für die Plausibilität der mit der *Bernese GPS Software* geschätzten ERP spricht v.a. der bekannte Versatz von etwa 0.4 mas gegenüber C04 im Y -Pol. Die Wiederholbarkeit der Koordinaten ist zwar ein wenig schlechter als diejenige der OCCAM-Lösung, mit 3–4 mm in der Lage und 9 mm in der Höhe aber sicherlich noch zufriedenstellend.

Wenn auch eine eigenständige VLBI-Software für sich allein genommen schon sehr viel wert ist, so liegt der eigentliche Gewinn der Implementierung der VLBI-Verarbeitung in die *Bernese GPS Software* doch sehr viel mehr in der Möglichkeit, unterschiedliche geodätische Raumverfahren quasi auf Beobachtungsebene kombinieren zu können. Da eine solche Kombination bislang nicht vorgenommen wurde, können deren Vorzüge zwar bislang nicht mit Resultaten untermauert werden, die theoretischen Vorteile wurden jedoch ausführlich herausgearbeitet. An diesem Punkt bieten sich also mit Sicherheit etliche spannende und vielversprechende Ansatzpunkte für weitere Forschungsarbeiten. Für diese wurden zwar die entscheidenden Voraussetzungen geschaffen, einige Fragen wie z.B. diejenige nach der geeigneten Gewichtung der unterschiedlichen Techniken, müssen jedoch noch beantwortet werden. Im Vergleich zu bisherigen Kombinationsstudien wäre auch von großem Interesse, die verschiedenen Raumverfahren nicht nur mittels EOP, Stationskoordinaten und Troposphärenparametern, sondern auch durch die gemeinsame Schätzung von Stationsuhren zu verknüpfen. Für eine mögliche Verarbeitung von VLBI-Beobachtungen zu GNSS-Satelliten bzw. von VLBI-Beobachtungen mit Hilfe von Teleskopen an Bord von Satelliten wurden ebenfalls die Grundvoraussetzungen geschaffen.

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte absolute Antennenkorrekturmodell, bestehend aus den von GFZ und TUM aus Mehrjahrelösungen geschätzten Phasenzentrumskorrekturen für die GPS-Satellitenantennen, entsprechenden Werten des CODE für die GLONASS-Satelliten, Roboterkalibrierungen der Geo++ GmbH für die Empfangsantennen sowie konvertierten Feldkalibrierungen des NGS, ist in der Zwischenzeit zu einem internationalen Standard geworden. Die Genauigkeit dieses Modells liegt bei etwa 4 cm für die PCOs der Satellitenantennen in z -Richtung, 1 mm für die PCVs der Satellitenantennen, ebenfalls etwa 1 mm für die Resultate der Roboterkalibrierung sowie wenig schlechteren Werten für die konvertierten NGS-Kalibrierungen.

Aufgrund der Tatsache, daß bei der Schätzung der Phasenzentrumskorrekturen für die Satellitenantennen der durch VLBI und SLR bestimmte globale terrestrische Maßstab fixiert wurde, liegt der Maßstab der IGS-Lösungen seit der Modellumstellung im November 2006 nahe beim Maßstab des ITRF2005. Außerdem konnte eine verbesserte Konsistenz der unabhängigen Lösungen der einzelnen IGS-Analysezentren festgestellt werden, die jedoch auch mit anderen Modellverbesserungen zusammenhängen dürfte. Sprünge in Koordinatenzeitreihen zum Zeitpunkt eines Antennenwechsels werden zwar z.T. kleiner, verschwinden jedoch keinesfalls vollständig. Aus diesem Grund sollten bei geplanten Veränderungen an der Instrumentierung einer Station nach Möglichkeit alte und neue Antenne für einen gewissen Zeitraum parallel betrieben werden, sofern getrennte Monumentierungen vorhanden sind, um die Größe des Sprungs genau bestimmen zu können. Auch der Übergang vom relativen auf das absolute Phasenzentrumsmodell hat, zusammen mit der zeitgleich vorgenommenen Übernahme des Referenzrahmens ITRF2005, Sprünge in den Koordinatenzeitreihen hinterlassen. Diese Sprünge lassen sich erst durch eine vollständige Neuverarbeitung aller Beobachtungsdaten des IGS beheben (Steigenberger et al., 2008).

Von besonderem Interesse für diese Arbeit war die Frage, ob sich systematische Effekte zwischen GPS und VLBI durch den Umstieg auf das absolute Antennenkorrekturmodell reduzieren lassen. Da sich solche Systematiken fatal auswirken können, sobald ein gemeinsamer Satz von Parametern geschätzt wird, hängt der Erfolg der Kombination unterschiedlicher Verfahren entscheidend von deren Beseitigung ab. Was die Raumvektoren zwischen den entsprechenden Referenzpunkten (*local ties*) betrifft, konnte zwar eine deutliche Reduzierung der Widersprüche zwischen lokalen Vermessungen und den Resultaten der Raumverfahren gezeigt werden, gleichwohl bleibt die Verknüpfung der Verfahren mit Hilfe von *local ties* inhomogener Qualität problematisch. Doch nicht nur die Stationskoordinaten profitieren von der Modellverbesserung, auch die zeitlichen Änderungen der Koordinaten, die sog. Stationsgeschwindigkeiten weisen eine deutlich verbesserte Übereinstimmung zwischen GPS und VLBI auf. Am bemerkenswertesten ist aber wohl die Veränderung der TZD-Werte, die aufgrund hoher Korrelationen besonders durch das relative Phasenzentrumsmodell verfälscht waren. Abgesehen von einigen Stationen mit nicht kalibriertem Radomeinfluß verschwinden die systematischen Fehler zwischen GPS und VLBI durch Berücksichtigung des Absolutmodells nahezu vollständig. Daß es sich eindeutig um ein Problem der GPS-Modellierung handelte, läßt sich auch anhand von Vergleichen mit den Daten von Wasserdampffradiometern und Wettermodellen belegen.

Im Zusammenhang mit absoluten Antennenkorrekturen sind im Vergleich zu früheren Publikationen (Schmid et al., 2007, 2005b; Schmid und Rothacher, 2003) insbesondere die Gegenüberstellungen der unterschiedlichen

Modelle für die Satellitenantennen von Bedeutung. Während die Schätzwerte von GFZ/TUM und JPL, die auf mehr oder weniger unabhängigen Ansätzen beruhen, bislang als unvereinbar galten, konnte nun gezeigt werden, daß allein die PCOs in z -Richtung einen konsistenten Versatz zeigen, während Differenzen zwischen individuellen Satelliten sowie PCVs gut übereinstimmen. Besonders beeindruckend ist die nahezu perfekte Übereinstimmung der azimutalen PCVs, die innerhalb des IGS bislang keine Anwendung finden. Auch wenn deren Einfluß auf globale Parameter gering sein dürfte, sollten sie in zukünftigen Modellen in jedem Fall berücksichtigt werden.

Zu den Defiziten des absoluten Phasenzentrumsmodells auf Seiten der Satellitenantennen zählen damit die Nichtberücksichtigung der Azimutabhängigkeit der PCVs sowie die ungeklärten *biases* zwischen den z -Offsets unterschiedlicher Analysezentren, welche direkt mit dem globalen terrestrischen Maßstab korreliert sind. Auch die Ursache der Systematiken in den Differenzen nadirabhängiger PCVs ist ungeklärt. Ein weiteres Problem besteht in der bisherigen Beschränkung auf einen maximalen Nadirwinkel von 14° , da GNSS-Antennen an Bord tieffliegender Satelliten auch oberhalb dieses Winkels beobachten. Wie die JPL-Werte, die auf LEO-Daten beruhen, zeigen, ist der Gradient der PCVs aber gerade in diesem Bereich ziemlich hoch, was mit dem Erreichen der Grenzen des Arbeitsbereichs der Satellitenantennen zusammenhängen könnte. Bevor es nicht gelingt, die JPL-Korrekturwerte mit dem offiziellen IGS-Modell zu verschmelzen, sollten Beobachtungen mit sehr großem Nadirwinkel daher am besten ungenutzt bleiben.

Auf Seiten der Empfängerantennen besteht das größte Defizit wohl in der Inhomogenität zwischen den Roboterkalibrierungen der Geo++ GmbH sowie den konvertierten Feldkalibrierungen des NGS. Letztere weisen nicht nur das Problem mangelnder Azimutabhängigkeit auf, sondern vor allem auch das Fehlen von Korrekturwerten unterhalb von 10° Elevation. Auch hier gilt, daß die Daten von Antennen, für die nur eine solche konvertierte Feldkalibrierung vorliegt, erst ab einer Elevation von 10° Verwendung finden sollten. Daneben besteht das Problem, daß für eine Vielzahl von Antennen/Radom-Kombinationen nach wie vor keinerlei Korrekturwerte vorhanden sind, einige noch nicht einmal kalibriert werden könnten. Einzige Lösung ist hier, im Falle der Neuausstattung einer Station sowie auf neuen Stationen nur noch Antennen zuzulassen, für welche die Ergebnisse einer Roboterkalibrierung vorab vorliegen. Innerhalb des *EUREF Permanent GNSS Network* (EPN) wird dies bereits auf diese Weise praktiziert (Bruyninx und Roosbeek, 2009), für IGS-Stationen ist eine entsprechende Vorschrift zumindest vorgesehen.

Sowohl auf Seiten der Satelliten als auch auf Seiten der Empfänger scheint momentan noch ungeklärt zu sein, auf welchem Wege und vor allem zu welchem Zeitpunkt Modellverbesserungen herbeigeführt werden könnten. Größtes Problem ist hierbei die Wahrung der Konsistenz der verschiedenen IGS-Produkte (Bahnen, Uhren, Stationskoordinaten) untereinander sowie auch deren Langzeitkonsistenz. Mit solchen und ähnlichen Fragen beschäftigt sich seit Februar 2008 eine vom IGS eingerichtete Arbeitsgruppe.

Sollten die GNSS-Systembetreiber so weit für das Problem der Antennenphasenzentren sensibilisiert werden können, daß zukünftig womöglich detaillierte Kalibrierungen der Sendeantennen bereits am Boden vorgenommen und auch der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden, dann könnten neue Einblicke in das „Bermuda-Dreieck“ der Satellitennavigation gewonnen werden. Als solches wurden von Beutler (1998) die hochkorrelierten Parameter zur Beschreibung der Troposphäre, der Antennenphasenzentren sowie der Stationshöhen bezeichnet. Wären für Sende- und Empfangsantennen unabhängige Kalibrierungen verfügbar, würden evtl. weitere systematische Fehler zutage treten, die momentan in den geschätzten Korrekturen für die Satellitenantennen verborgen liegen. Als positives Signal in dieser Richtung können die von Zandbergen und Navarro (2006) angegebenen Korrekturwerte für die Galileo-Testsatelliten betrachtet werden. Angaben zu möglichen PCVs fehlen zwar, dafür sind gesonderte PCO-Werte für jede Trägerfrequenz gegeben.

A. Beispieldateien

A.1. NGS Card File

Im folgenden ist ein Auszug der Datei 02DEC02XK_N003, der INT2-Beobachtungsdatei (vgl. Kap. 3.3.5) vom 2. Dezember 2002 gegeben. Innerhalb der ersten drei Meßepochen wurden dabei die Quasare mit den Bezeichnungen 1749+096, 1726+455 und 1300+580 von den Teleskopen TSUKUB32 und WETTZELL beobachtet. Die letzte Ziffer in den Datenzeilen gibt an, um welche *Card* (vgl. Kap. 2.3) es sich jeweils handelt. Die vollständige Formatbeschreibung ist auf der Homepage¹ des GSFC zu finden.

```

DATA IN NGS FORMAT FROM DATABASE 02DEC02XK_V003
Observed delays and rates in card #2, modified errors in card #9
TSUKUB32  -3957408.75200  3310229.36700  3737494.78900  AZEL  .00000
WETTZELL   4075539.89500   931735.27000  4801629.35500  AZEL  .00000
$END
1749+096  17  51    32.818573   9  39    .728510
1726+455  17  27    27.650808  45  30   39.731390
1300+580  13   2    52.465282  57  48   37.609420
$END
.8212990000000D+04          GR PH
$END
TSUKUB32  WETTZELL  1749+096  2002  12  02  07  31   .0000000000          101
  4488483.80474621   .00619 -1974118.8560980940   .00795  0    I    102
  .00156   .00000   .00000   .00000  4.511027902999185   0.    103
  .00   .0   .00   .0   .00   .0   .00   .0   104
  16.63983  3.46490   .00000   .00000   .00000   .00000          105
  10.400   1.500  1019.200  934.800   87.400   91.100  0  0   106
  .5004291155   .00339   -.0485943101   .00293  0          108
  4488483.80474621   .00795 -1974118.8560980940   .00795  0    I    109
TSUKUB32  WETTZELL  1726+455  2002  12  02  07  35  30.0000000000          201
 -1353787.97432337   .01524 -1425364.0919276050   .01820  0    I    202
  .00061   .00000   .00000   .00000 -5.729547139753654   0.    203
  .00   .0   .00   .0   .00   .0   .00   .0   204
  16.63898  3.46503   .00000   .00000   .00000   .00000          205
  10.300   1.400  1019.300  934.800   89.400   92.300  0  0   206
  .2877317489   .00543   -.0678436485   .00444  0          208
 -1353787.97432337   .01604 -1425364.0919276050   .01820  0    I    209
TSUKUB32  WETTZELL  1300+580  2002  12  02  07  38  20.0000000000          301
 -16336474.57786337   .01919 -487585.8222086961   .02292  0    I    302
  .00048   .00000   .00000   .00000 -4.182409537133608   0.    303
  .00   .0   .00   .0   .00   .0   .00   .0   304
  16.63835  3.46978   .00000   .00000   .00000   .00000          305
  10.300   1.400  1019.300  934.800   90.400   92.100  0  0   306
  -.1342533458   .00475   -.0520455208   .00398  0          308
 -16336474.57786337   .01983 -487585.8222086961   .02292  0    I    309

```

¹http://lacerta.gsfc.nasa.gov/mk5/help/dbngs_format.txt

A.2. Bernese Observation File

Im folgenden ist die mit Hilfe des Programms FMTOVLBI (vgl. Kap. 3.1) ins *Bernese*-Format konvertierte Beispieldatei aus Anhang A.1 gegeben. Es handelt sich dabei um die ASCII-Version der Datei unter dem Namen TsWz3360.FCS. Im Gegensatz zum *NGS card file* enthält die *Bernese*-Datei lediglich interne Quasarnummern (1517, 1498 bzw. 1381). Stations- und Quasarkoordinaten werden in gesonderten Dateien vorgehalten und erscheinen daher nicht in der Beobachtungsdatei. Die zugehörige Formatbeschreibung ist auf S. 499ff in Dach et al. (2007) zu finden.

```

VLBI_INT2      :   VLBI DATA FROM DATA BASE: 02DEC02 DBC:K VERS:003

MEASUREMENT TYPE: VLBI                      CREATED : 09-APR-08 16:43
REFERENCE EPOCH : 2002-12-02 7:31:13 (336)  MODIFIED: 09-APR-08 16:43

# DIFFERENCES      :      1          FORMAT NUMBER      :      6
# FREQUENCIES      :      2          SESSION IDENTIFIER : 3360
# QUASARS          :      3          SUBSESSION IDENTIF.:      1
# EPOCHS          :     441          OBS. INTERVAL (S) :      1
# FLAGGED EPOCHS   :      0          REMARK NUMBER     :      0

STATION NAME      : TSUKUB32              WETTZELL
OPERATOR NAME     :
RECEIVER TYPE     : AZEL                  AZEL
ANTENNA TYPE      : VLBI                  VLBI
RECEIVER/ANTENNA :      0 /      0        0 /      0

CLOCK CORRECTION: NONE                    NONE

AXIS OFFSET (M):  0.0000  0.0000  0.0000      0.0000  0.0000  0.0000

QUA   #X-OBS OK   #X-OBS BAD   #S-OBS OK   #S-OBS BAD
1517      1         0           1           0
1498      1         0           1           0
1381      1         0           1           0

X,S OBSERVATIONS:
OBS.N   TIME   F #S   DELAY (M)  FFS QUA   ...
      1  7:31:13   1  -1345613.442  0 1517  2-12-02  0.000000000  0.000000000
                -1345613.442  0 1517

      271  7:35:43   1   405855.511  0 1498  2-12-02  0.000000000  0.000000000
                405855.511  0 1498

      441  7:38:33   1  4897551.829  0 1381  2-12-02  0.000000000  0.000000000
                4897551.829  0 1381

```

B. Flußdiagramme

B.1. Programm FMTOVLBI

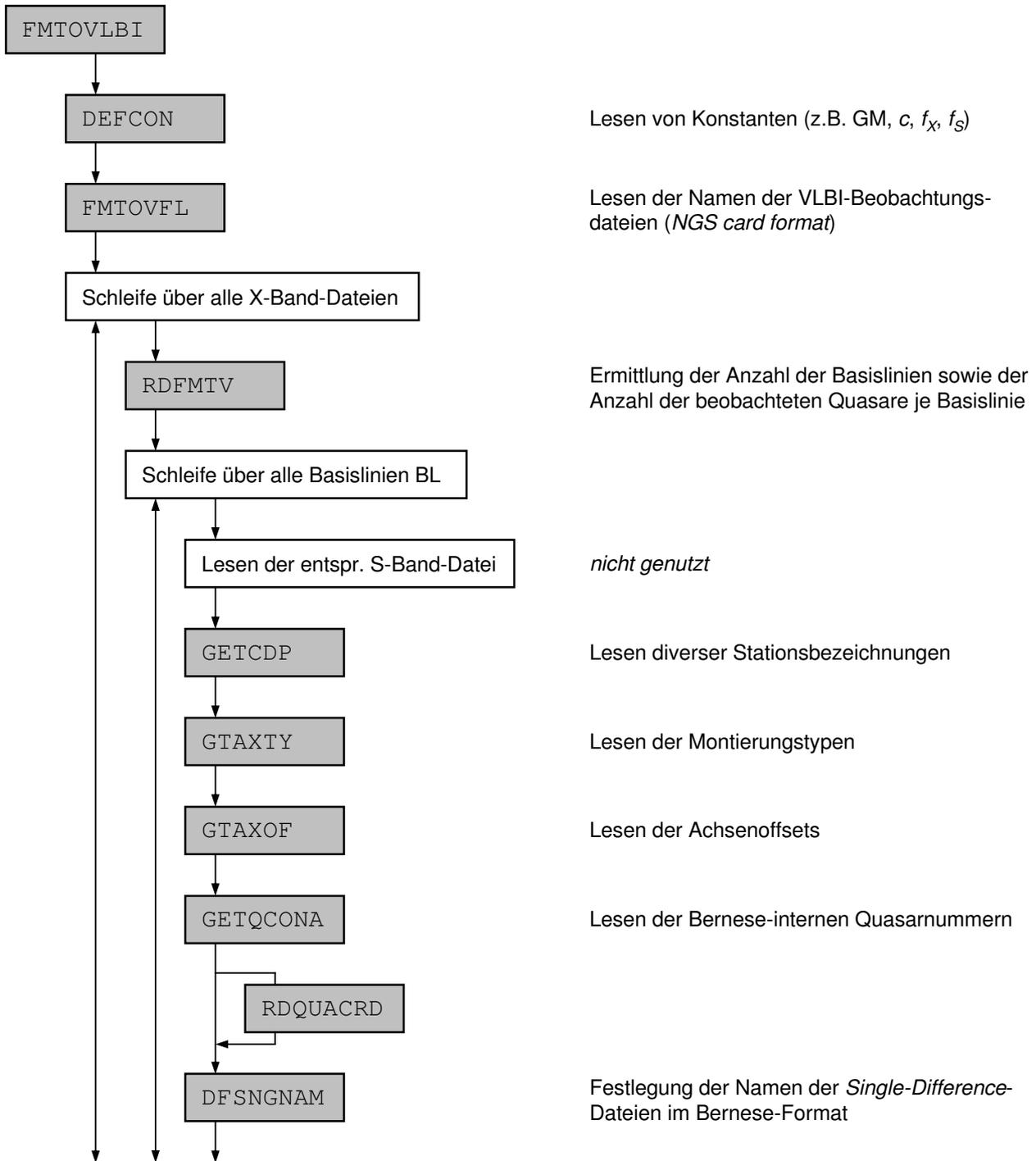


Abb. B.1.: Flußdiagramm des in Kap. 3.1 beschriebenen Programms FMTOVLBI (Teil 1).

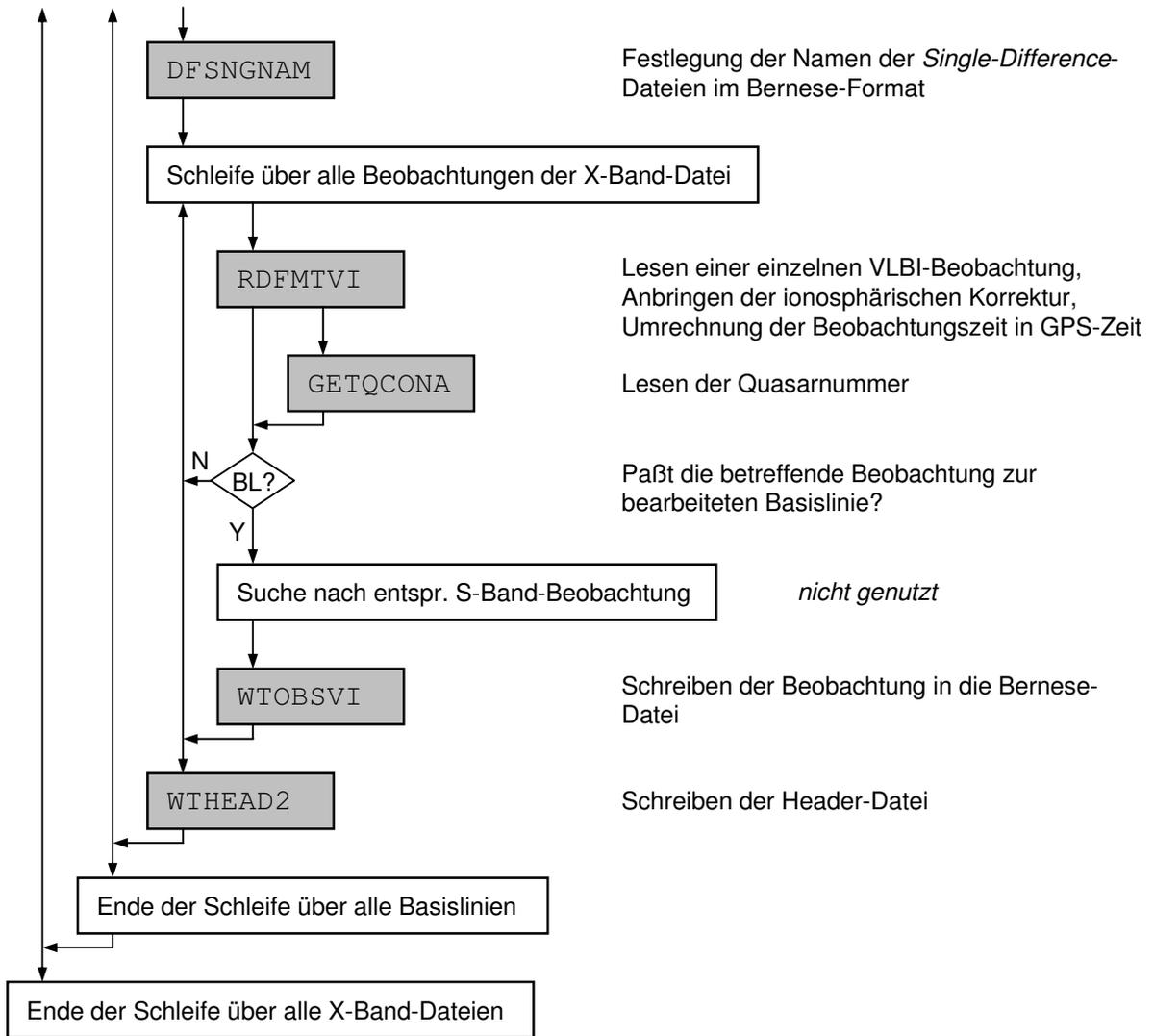


Abb. B.2.: Flußdiagramm des in Kap. 3.1 beschriebenen Programms FMTOVLBI (Teil 2).

B.2. Programm GPSEST

Hier werden nur die für Kap. 3.2 bedeutsamen Programmteile gezeigt. Einen Überblick über das gesamte Programm findet sich auf S. 155 in Dach et al. (2007).

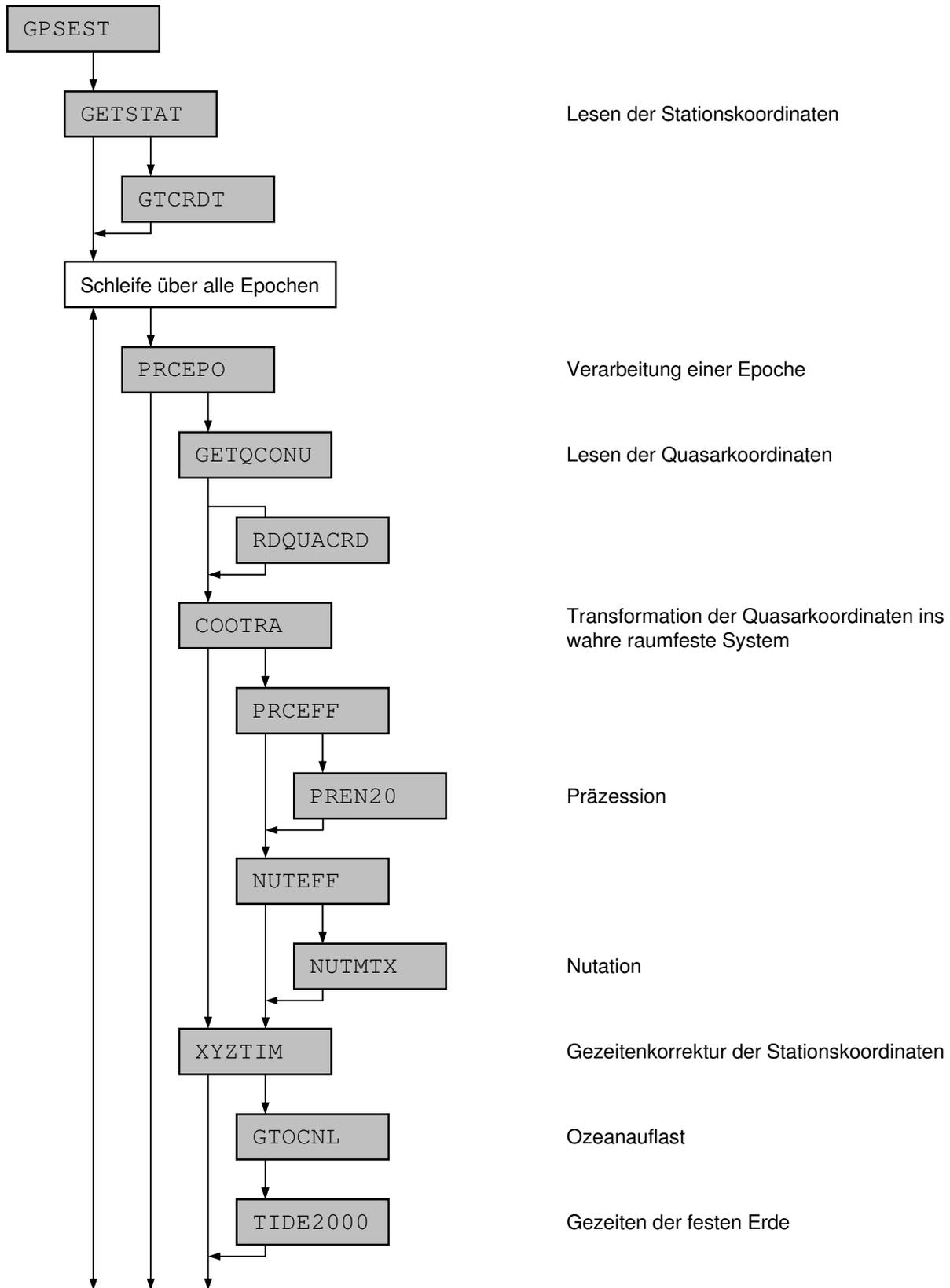


Abb. B.3.: Flußdiagramm der für Kap. 3.2 relevanten Teile des Programms GPSEST (Teil 1).

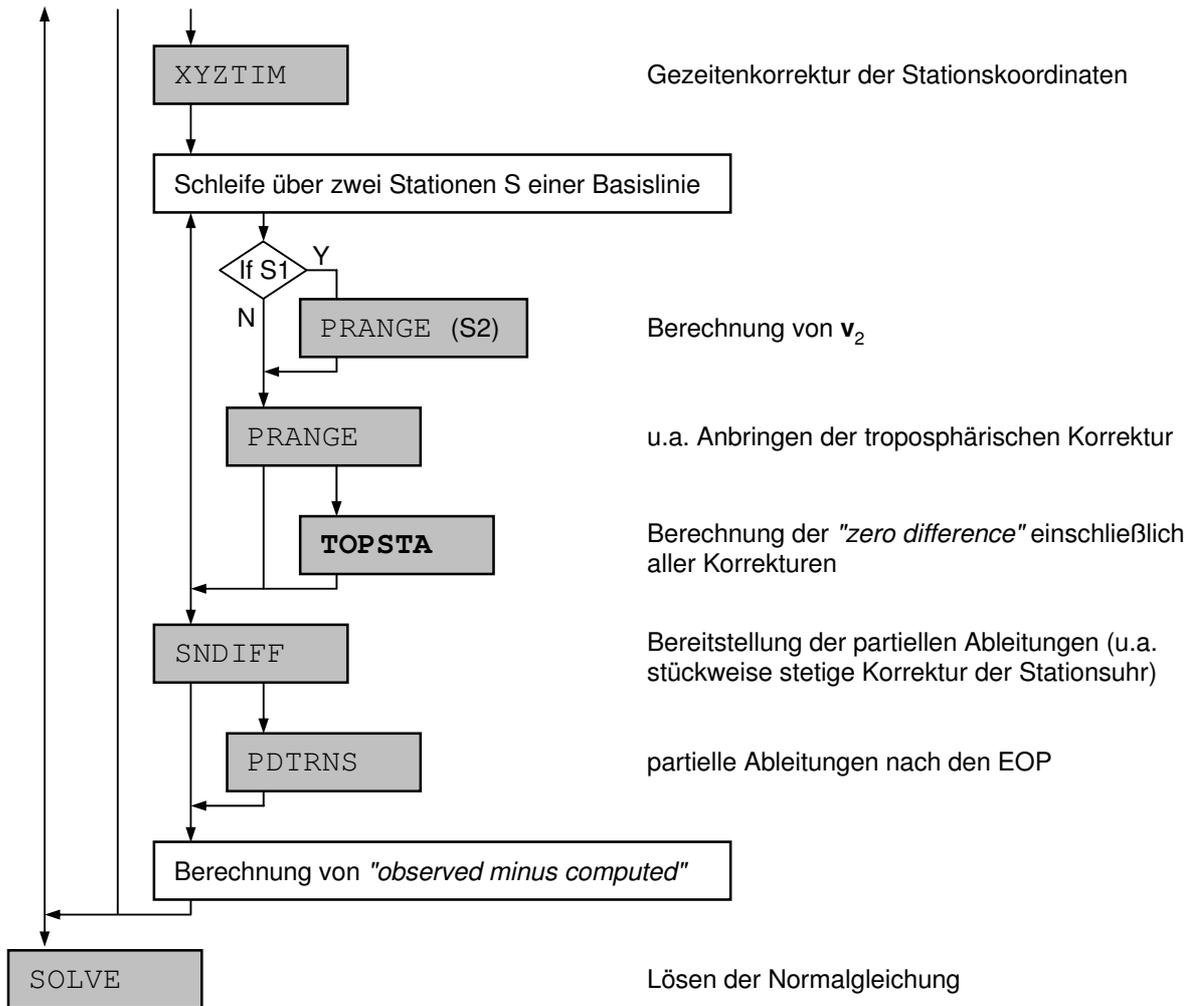


Abb. B.4.: Flußdiagramm der für Kap. 3.2 relevanten Teile des Programms GPSEST (Teil 2).

Literaturverzeichnis

- Altamimi Z, Sillard P, Boucher C (2002) ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science applications. *J Geophys Res* 107(B10), 2214, DOI: 10.1029/2001JB000561
- Altamimi Z, Boucher C, Drewes H, Ferland R, Larson K, Ray J, Rothacher M (2003) Combination of station positions and velocities. In: Richter B, Schwegmann W, Dick WR (eds) *Proc IERS Workshop on combination research and global geophysical fluids*, IERS Technical Note 30, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, pp 19-27
- Altamimi Z, Coulot D, Berio P, Exertier P (2006) How can combination help to achieve consistency at the 0.1 ppb level? Presented at GGOS 2006 Workshop „Towards a consistent geodetic foundation for Earth observations“ (verfügbar unter http://geodesy.unr.edu/ggos/ggosws_2006/position_papers/altamimi_etal_position_paper.pdf)
- Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, Garayt B, Boucher C (2007) ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth orientation parameters. *J Geophys Res* 112(B9), B09401, DOI: 10.1029/2007JB004949
- Andersen OB (2004) Resolutions adopted at the IUGG XXIIIrd General Assembly. *J Geod* 77(10-11): 699-704, DOI: 10.1007/s00190-003-0371-0
- Andersen PH (1986) GEOSAT - a computer program for precise reduction and simulation of satellite tracking data. In: *Proc 4th Int. Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Austin, pp 365-376
- Andersen PH (1995) High-precision station positioning and satellite orbit determination. PhD thesis, NDRE/publication 95/01094
- Andersen PH, Rekkedal S (1995) VLBI data analysis with the GEOSAT software. *Bull Géod* 69(3): 125-134, DOI: 10.1007/BF00815481
- Andersen PH (2000) Multi-level arc combination with stochastic parameters. *J Geod* 74(7-8): 531-551, DOI: 10.1007/s001900000115
- Andersen PH (2007) FFI Technology Development Center - software development. In: Behrend D, Bayer KD (eds) *IVS 2006 Annual Report*, NASA, Hanover, NASA/TP-2007-214151, pp 246-247
- Aparicio M, Brodie P, Doyle L, Rajan J, Torriano P (1995) GPS satellite and payload. In: Parkinson BW, Spilker JJ (eds, 1996) *Global Positioning System: theory and applications*, Vol. I, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, pp 209-244
- Appleby GM, Otsubo T (2004) Laser ranging as a precise tool to evaluate GNSS orbital solutions. In: *Proc ILRS 2004 Workshop*, San Fernando (verfügbar unter <http://cddis.nasa.gov/lw14/>)
- Bare C, Clark BG, Kellermann KI, Cohen MH, Jauncey DL (1967) Interferometer experiment with independent local oscillators. *Science* 157(3785): 189-191, DOI: 10.1126/science.157.3785.189
- Bar-Sever Y (1996) A new model for GPS yaw attitude. *J Geod* 70(11): 714-723, DOI: 10.1007/BF00867149
- Bar-Sever Y (1997) Information regarding Block IIR modeling. IGSMail-1653, IGS Central Bureau, Pasadena
- Bar-Sever YE (1998) Estimation of the GPS transmit antenna phase center offset. *EOS Transactions* 79(45): 183
- Bar-Sever Y, Bertiger W, Byun S, Desai S, Haines B, Hajj G (2006) Calibrating the GPS satellites transmit antenna. Presented at the IGS Workshop 2006, Darmstadt
- Benedicto J, Dinwiddie SE, Gatti G, Lucas R, Lugert M (2000) *Galileo: Satellite system design and technology developments*. European Space Agency
- Berg H (1948) *Allgemeine Meteorologie - Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Ferdinand Dümmlers Verlag, Bonn
- Bertarini A, Corey B, Kingham K, Roy A (2007) CONT05 B. IVS Memorandum 2007-002v01 (verfügbar unter <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/memos/ivs-2007-002v01.pdf>)
- Beutler G, Kouba J, Springer T (1995) Combining the orbits of the IGS Analysis Centers. *Bull Géod* 69(4): 200-222, DOI: 10.1007/BF00806733
- Beutler G (1996) Summary of 1996 Silver Spring AC Workshop. IGSMail-1266, IGS Central Bureau, Pasadena

- Beutler G (1998) The role of GPS in space geodesy. In: Teunissen PJG, Kleusberg A (eds) GPS for Geodesy, Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 625-650
- Beutler G, Weber R, Brockmann E, Rothacher M, Schaer S, Verdun A (1998) The GPS as a tool in global geodynamics. In: Teunissen PJG, Kleusberg A (eds) GPS for Geodesy, Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 569-598
- Beutler G, Rothacher M, Schaer S, Springer TA, Kouba J, Neilan RE (1999) The International GPS Service (IGS): an interdisciplinary service in support of Earth sciences. *Adv Space Res* 23(4): 631-653, DOI: 10.1016/S0273-1177(99)00160-X
- Bird P (2003) An updated digital model of plate boundaries. *Geochem Geophys Geosyst* 4(3), 1027, DOI: 10.1029/2001GC000252
- Bizouard C, Gambis D (2007) The combined solution C04 for Earth Orientation Parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame 2005. Observatoire de Paris (verfügbar unter http://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc04_05/C04_05_guide.pdf)
- Blewitt G, Bock Y, Kouba J (1995) Constructing the IGS polyhedron by distributed processing. In: Zumbege JF, Liu R (eds) Proc IGS 1994 Workshop, Pasadena, pp 21-37
- Böder V (2002) Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, 245
- Boehm J, Schuh H (2004) Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophys Res Lett* 31(1), L01603, DOI: 10.1029/2003GL018984
- Boehm J, Werl B, Schuh H (2006a) Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *J Geophys Res* 111(B2), B02406, DOI: 10.1029/2005JB003629
- Boehm J, Niell A, Tregoning P, Schuh H (2006b) Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys Res Lett* 33(7), L07304, DOI: 10.1029/2005GL025546
- Boehm J, Heinkelmann R, Schuh H (2007) Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *J Geod* 81(10): 679-683, DOI: 10.1007/s00190-007-0135-3
- Bolotin S, Yatskiv Y, Lytvyn S (2007) IVS analysis center at Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine. In: Behrend D, Baver KD (eds) IVS 2006 Annual Report, NASA, Hanover, NASA/TP-2007-214151, pp 214-215
- Bouma HR (2002) Ground-based GPS in climate research. Technical report no. 456L, licentiate thesis at the School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg
- Bourda G, Charlot P, Biancale R (2007) GINS: a new tool for VLBI geodesy and astrometry. In: Boehm J, Pany A, Schuh H (eds) Proc 18th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, *Geowissenschaftliche Mitteilungen*, Nr. 79, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, TU Wien
- Braun J, Stephens B, Ruud O, Meertens C (1997) The effect of antenna covers on GPS baseline solutions. UNAVCO report, University NAVSTAR Consortium, Boulder (verfügbar unter http://facility.unavco.org/science_tech/dev_test/publications/dome_report/domeX5Freport-1.html)
- Breuer B, Campbell J, Görres B, Hawig J, Wohlleben R (1995) Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. *SPN - Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, Heft 2, pp 49-59
- Brockmann E (1997) Combination of solutions for geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System (GPS). *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, 55, Schweizerische Geodätische Kommission
- Brotten NW, Legg TH, Locke JL, McLeish CW, Richards RS, Chisholm RM, Gush HP, Yen JL, Galt JA (1967) Long baseline interferometry: a new technique. *Science* 156(3782): 1592-1593, DOI: 10.1126/science.156.3782.1592
- Bruyninx C, Defraigne P, Sleewaegen J-M (1999) Time and frequency transfer using GPS codes and carrier phases: onsite experiments. *GPS Sol* 3(2): 1-10, DOI: 10.1007/PL00012786
- Bruyninx C, Roosbeek F (2009) EPN status and new developments. In: EUREF Publication No. 17 (verfügbar unter http://www.epncb.oma.be/_newsmails/papers/)
- Campbell J (1979) Die Radiointerferometrie auf langen Basen als geodätisches Meßprinzip hoher Genauigkeit. *DGK Reihe C*, Heft 254, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
- Campbell J, Görres B, Siemes M, Wirsch J, Becker M (2004) Zur Genauigkeit der GPS Antennenkalibrierung auf der Grundlage von Labormessungen und deren Vergleich mit anderen Verfahren. *AVN*, 1/2004, pp 2-11

- Capitaine N, Wallace PT, McCarthy DD (2003) Expressions to implement the IAU 2000 definition of UT1. *Astron Astrophys* 406: 1135-1149, DOI: 10.1051/0004-6361:20030817
- Cardellach E, Elósegui P, Davis JL (2007) Global distortion of GPS networks associated with satellite antenna model errors. *J Geophys Res* 112(B7), B07405, DOI: 10.1029/2006JB004675
- Chao BF, Ray RD (1997) Oceanic tidal angular momentum and Earth's rotation variations. *Progress in Oceanography* 40(1-4): 399-421, DOI: 10.1016/S0079-6611(98)00010-X
- Charlot P (1990) Radio-source structure in astrometric and geodetic very long baseline interferometry. *Astron J* 99(4): 1309-1326, DOI: 10.1086/115419
- Choi C (2002) Phase centers of GPS IIF modernization L-band antenna. In: Proc ION-GPS02, Portland, pp 241-244
- Corey B, Himwich E, Springer TA, Herring TA, Appleby G, Biancale R, Nothnagel A, Schlüter W, Vandenberg NR (2002) Final report of the IVS/IGS/ILRS joint working group on GPS phase center mapping. Unveröffentlichter Entwurf
- Coromina F, Deborgies F, Emma F, Gatti G (2004) On-board applications of active microwave technologies to Galileo and other European space programs. In: Proc Gallium Arsenide Applications Symposium (GAAS) 2004, Amsterdam (verfügbar unter <http://amsacta.cib.unibo.it/archive/00001073/01/GA043194.PDF>)
- Coulot D, Berio P, Biancale R, Loyer S, Soudarin L, Gontier A-M (2007) Toward a direct combination of space-geodetic techniques at the measurement level: methodology and main issues. *J Geophys Res* 112(B5), B05410, DOI: 10.1029/2006JB004336
- Czopek FM, Shollenberger S (1993) Description and performance of the GPS Block I and II L-Band antenna and link budget. In: Proc ION-GPS93, Salt Lake City, pp 37-43
- Dach R, Hugentobler U, Fridez P, Meindl M (2007) Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern (verfügbar unter <http://www.bernese.unibe.ch/docs/D0CU50.pdf>)
- Dawson J, Titov O, Johnston G, Naebkhil S, Woods A, Govind R (2005) The impact of gravitational sag on VLBI results of the Hobart, Mt. Pleasant Radio Observatory. *Geophys Res Abstr* 7, 02940
- Degnan JJ, Pavlis EC (1994) Laser ranging to GPS satellites with centimeter accuracy. *GPS World* 5(9): 62-70
- DeMets C, Gordon RG, Argus DF, Stein S (1990) Current plate motions. *Geophys J Int* 101(2): 425-478, DOI: 10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x
- DeMets C, Gordon RG, Argus DF, Stein S (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys Res Lett* 21(20): 2191-2194, DOI: 10.1029/94GL02118
- Dill R (2002) Der Einfluß von Sekundäreffekten auf die Rotation der Erde. DGK Reihe C, Heft 550, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
- Dilckner F, Seeber G, Schmitz M, Wübbena G, Toso G, Maesli D (2006) Characterization of GOCE SSTI antennas. *zfv* 131(2): 61-71
- Dong D, Herring TA, King RW (1998) Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *J Geod* 72(4): 200-214, DOI: 10.1007/s001900050161
- Dow JM, Neilan RE, Gendt G (2005) The International GPS Service (IGS): celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade. *Adv Space Res* 36(3): 320-326, DOI: 10.1016/j.asr.2005.05.125
- Drewes H (2006) The actual plate kinematic and deformation model (APKIM) 2005. *Geophys Res Abstr* 8, 05026
- Elgered G, Haas R (2003) The geodetic VLBI network station at the Onsala Space Observatory - activities during 2002. In: Schwegmann W, Thorandt V (eds) Proc 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt/Leipzig, pp 61-66
- Elósegui P, Davis JL, Jaldehag RTK, Johansson JM, Niell AE, Shapiro II (1995) Geodesy using the Global Positioning System: the effects of signal scattering on estimates of site position. *J Geophys Res* 100(B6): 9921-9934, DOI: 10.1029/95JB00868
- Eubanks TM (1991) A consensus model for relativistic effects in geodetic VLBI. In: Eubanks TM (ed) Proc USNO Workshop on relativistic models for use in space geodesy, Washington, pp 60-82
- Feigl KL, Agnew DC, Bock Y, Dong D, Donnellan A, Hager BH, Herring TA, Jackson DD, Jordan TH, King RW, Larsen S, Larson KM, Murray MH, Shen Z, Webb FH (1993) Space geodetic measurement of crustal deformation in central and southern California, 1984-1992. *J Geophys Res* 98(B12): 21677-21712

- Feldmann-Westendorff U, Sorge B (2002) Vergleichstest von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen. In: Campbell J, Seeber G (eds) Proc 4. GPS-Antennenworkshop, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Hannover
- Ferland R (2003) IGS00(v2) final. IGSMail-4666, IGS Central Bureau, Pasadena
- Ferland R, Gendt G, Schöne T (2005) IGS reference frame maintenance. In: Meindl M (ed) Proc IGS 2004 Workshop and Symposium, Bern, pp 13-34
- Ferland R (2006) Proposed IGS05 realization. IGSMail-5447, IGS Central Bureau, Pasadena
- Fey AL, Charlot P (2000) VLBA observations of radio reference frame sources. III. Astrometric suitability of an additional 225 sources. *Astrophys J Suppl Ser* 128(1): 17-83, DOI: 10.1086/313382
- Fey AL, Ma C, Arias EF, Charlot P, Feissel-Vernier M, Gontier A-M, Jacobs CS, Li J, MacMillan DS (2004) The second extension of the International Celestial Reference Frame: ICRF-Ext. 2. *Astron J* 127(6): 3587-3608, DOI: 10.1086/420998
- Fischer D, Nothnagel A, Kilger R, Schlüter W, Kurihara S, Takashima K (2003) The K4 Intensive project 2002 for UT1 determination. In: Schwegmann W, Thorandt V (eds) Proc 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt/Leipzig, pp 165-170
- Frevert V, Stöcker D, Nuckelt A (2003) Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen. In: Proc DGON-Symposium Positionierung und Navigation POSNAV 2003, Schriftenreihe des Geodätischen Instituts der TU Dresden, Heft 3, pp 353-359
- Frey S, Meyer U, Fejes I, Paragi Z, Charlot P, Biancale R (2002) Geodetic space VLBI: the first test observations. *Adv Space Res* 30(2): 357-361, DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00307-1
- Gambis D (ed, 1999) First extension of the ICRF, ICRF-Ext. 1. IERS 1998 Annual Report, pp 87-114
- Gambis D (2004) Monitoring Earth orientation using space-geodetic techniques: state-of-the-art and prospective. *J Geod* 78(4-5): 295-303, DOI: 10.1007/s00190-004-0394-1
- Gatti G, Garutti A, Mandorlo G, Paffet J, Bradford A, Rooney E (2006) The GIOVE-A satellite: from design to in-orbit commissioning. In: Proc ION-GNSS06, Fort Worth, pp 2542-2547
- Ge M, Gendt G (2005) Estimation and validation of IGS absolute antenna phase center variations. In: Meindl M (ed) Proc IGS 2004 Workshop and Symposium, Bern
- Ge M, Gendt G, Dick G, Zhang FP, Reigber C (2005) Impact of GPS satellite antenna offsets on scale changes in global network solutions. *Geophys Res Lett* 32(6), L06310, DOI: 10.1029/2004GL022224
- Geiger A (1988) Einfluß und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 43, Zürich
- Gendt G, Dick G, Mai W, Nischan T, Sommerfeld W (1994) Nutzerhandbuch zum Programmsystem EPOS.P.V2 (Earth parameters and orbit determination system) für die Analyse von GPS-Daten. GFZ Potsdam
- Gendt G, Schmid R (2005) Planned changes to IGS antenna calibrations. IGSMail-5189, IGS Central Bureau, Pasadena
- Gendt G (2006) IGS switch to absolute antenna model and ITRF2005. IGSMail-5438, IGS Central Bureau, Pasadena
- Gibbs P, Appleby G, Potter C (2007) A reassessment of laser ranging accuracy at SGF Herstonceux, UK. In: Luck J, Moore C, Wilson P (eds) Proc ILRS 2006 Workshop, Canberra, pp 154-158
- Görres B, Campbell J, Becker M, Siemes M (2006) Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. *GPS Sol* 10(2): 136-145, DOI: 10.1007/s10291-005-0015-3
- Gontier A-M (1992) Orientation de la Terre par mesure VLBI - contribution à la chaîne d'analyse de VLBI astrométrique GLORIA. Thèse de doctorat, Observatoire de Paris
- Gontier A-M, Feissel M (2002) PIVEX: a proposal for a platform independent VLBI exchange format. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) Proc IVS 2002 General Meeting, Tsukuba, pp 248-254
- Gordon D (2004) CALC: the next upgrade. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) Proc IVS 2004 General Meeting, Ottawa, NASA/CP-2004-212255, pp 265-266
- Gross RS (2000) The excitation of the Chandler wobble. *Geophys Res Lett* 27(15): 2329-2332, DOI: 10.1029/2000GL011450
- Guo J, Langley RB (2003) A new tropospheric propagation delay mapping function for elevation angles down to 2°. In: Proc ION-GPS/GNSS03, Portland, pp 376-386 (verfügbar unter <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/iongpsgnss2003.guo.pdf>)

- Haas R (2004) Analysis strategies and software for geodetic VLBI. In: Bachiller R, Colomer F, Desmurs J-F, de Vicente P (eds) Proc 7th European VLBI Network Symposium, Observatorio Astronómico Nacional, Toledo, pp 297-301
- Haines B, Bar-Sever Y, Bertiger W, Desai S, Willis P (2004) One-centimeter orbit determination for Jason-1: new GPS-based strategies. *Marine Geodesy* 27(1-2): 299-318, DOI: 10.1080/01490410490465300
- Haines B, Bar-Sever Y, Bertiger W, Byun S, Desai S, Hajj G (2005) GPS satellite antenna phase center variations: new perspectives from the GRACE mission. Presented at Dynamic Planet 2005, Joint Meeting of the IAG, IAPSO and IABO, Cairns
- Hase H (1999) Theorie und Praxis globaler Bezugssysteme. Mitteilungen des BKG, Band 13, Verlag des BKG, Frankfurt/Main
- Hatanaka Y, Sawada M, Horita A, Kusaka M, Johnson JM, Rocken C (2001) Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET - Part 2: Evaluation of the phase map by GEONET data. *Earth Planets Space* 53(1): 23-30
- Hefty J, Rothacher M, Springer T, Weber R, Beutler G (2000) Analysis of the first year of Earth rotation parameters with a sub-daily resolution gained at the CODE processing center of the IGS. *J Geod* 74(6): 479-487, DOI: 10.1007/s001900000108
- Heise S (2002) Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS-Messungen. Dissertation, FU Berlin (verfügbar unter <http://www.diss.fu-berlin.de/2002/273/>)
- Herring TA, Corey BE, Counselman III CC, Shapiro II, Rönnäng BO, Rydbeck OEH, Clark TA, Coates RJ, Ma C, Ryan JW, Vandenberg NR, Hinteregger HF, Knight CA, Rogers AEE, Whitney AR, Robertson DS, Schupler BR (1981) Geodesy by radio interferometry: intercontinental distance determinations with subdecimeter precision. *J Geophys Res* 86(B3): 1647-1651
- Herring TA (1983) The precision and accuracy of international distance determinations using radio interferometry. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology
- Herring TA (1992) Submillimeter horizontal position determination using very long baseline interferometry. *J Geophys Res* 97(B2): 1981-1990
- Herring TA, King RW, McClusky SC (2006) GLOBK (Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program) reference manual. Release 10.3, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology (verfügbar unter http://chandler.mit.edu/~simon/gt/gk/GLOBK_Ref_10.3.pdf)
- Hirabayashi H, Hirose H, Kobayashi H, Murata Y, Asaki Y, Avruch IM, Edwards PG, Fomalont EB, Ichikawa T, Kii T, Okayasu R, Wajima K, Inoue M, Kawaguchi N, Chikada Y, Bushimata T, Fujisawa K, Horiuchi S, Kamenno S, Miyaji T, Shibata KM, Shen Z-Q, Umemoto T, Kasuga T, Nakajima J, Takahashi Y, Enome S, Morimoto M, Ellis J, Meier DL, Murphy DW, Preston RA, Smith JG, Wietfeldt RD, Benson JM, Claussen MJ, Flatters C, Moellenbrock GA, Romney JD, Ulvestad JS, Langston GI, Minter AH, D'Addario LR, Dewdney PE, Dougherty SM, Jauncey DL, Lovell JEJ, Tingay SJ, Tzioumis AK, Taylor AR, Cannon WH, Gurvits LI, Schilizzi RT, Booth RS, Popov MV (2000) The VLBI Space Observatory Programme and the radio-astronomical satellite HALCA. *Publ Astron Soc Japan* 52(6): 955-965
- Hirabayashi H, Murata Y, Edwards PG, Asaki Y, Mochizuki N, Inoue M, Umemoto T, Kamenno S, Kono Y (2004) On the near-term space VLBI mission VSOP-2. In: Bachiller R, Colomer F, Desmurs J-F, de Vicente P (eds) Proc 7th European VLBI Network Symposium, Observatorio Astronómico Nacional, Toledo, pp 285-288
- Hopfield HS (1969) Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *J Geophys Res* 74(18): 4487-4499
- Hugentobler U, Schaer S, Fridez P (2001) Bernese GPS Software, Version 4.2. Astronomical Institute, University of Bern (verfügbar unter <http://www.aiub-download.unibe.ch/BERN42/DOCU/docu42.pdf>)
- Hugentobler U, Ineichen D, Beutler G (2003) GPS satellites: radiation pressure, attitude and resonance. *Adv Space Res* 31(8): 1917-1926, DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00174-1
- Hugentobler U, Schaer S, Beutler G, Bock H, Dach R, Jäggi A, Meindl M, Urschl C, Mervart L, Rothacher M, Wild U, Wiget A, Brockmann E, Ineichen D, Weber G, Habrich H, Boucher C (2004) CODE IGS Analysis Center Technical Report 2002. In: Gowey K, Neilan R, Moore A (eds) IGS 2001-2002 Technical Reports, IGS Central Bureau, Pasadena, pp 43-51
- Hurst KJ, Bar-Sever Y (1998) In-situ GPS antenna phase center calibration. OPS/MET, Tokyo (verfügbar unter <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/20513/1/98-1504.pdf>)
- Husson V (2003) Absolute and relative range bias detection capabilities. In: Noomen R, Klosko S, Noll C, Pearlman M (eds) Proc ILRS 2002 Workshop, Washington, NASA/CP-2003-212248

- IUGG (1992) IUGG resolutions adopted at the XXth IUGG General Assembly in Vienna and related to geodesy. *Bull Geod* 66(2): 128-129, DOI: 10.1007/BF00989258
- Janssen MA (ed, 1993) *Atmospheric remote sensing by microwave radiometry*. Wiley & Sons, New York
- Jin S, Wang J, Park P-H (2005) An improvement of GPS height estimations: stochastic modeling. *Earth Planets Space* 57(4): 253-259
- Kang Z, Tapley B, Ries J, Bettadpur S, Nagel P (2007) Impact of GPS satellite antenna offsets on GPS-based precise orbit determination. *Adv Space Res* 39(10): 1524-1530, DOI: 10.1016/j.asr.2006.11.003
- Kaniuth K, Stuber K (2002) The impact of antenna radomes on height estimates in regional GPS networks. In: Drewes H, Dodson A, Fortes LPS, Sánchez L, Sandoval P (eds) *Vertical reference systems*. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 124, Springer, New York, pp 101-106
- Kaniuth K, Vetter S (2006) Estimating atmospheric pressure loading regression coefficients from GPS observations. *GPS Sol* 10(2): 126-134, DOI: 10.1007/s10291-005-0014-4
- Kaplan GH (2005) The IAU resolutions on astronomical reference systems, time scales, and Earth rotation models: explanation and implementation. U.S. Naval Observatory Circular No. 179, USNO, Washington, D.C. (verfügbar unter http://aa.usno.navy.mil/publications/docs/Circular_179.php)
- Keihm SJ, Bar-Sever Y, Liljegren JC (2002) WVR-GPS comparison measurements and calibration of the 20-32 GHz tropospheric water vapor absorption model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(6): 1199-1210, DOI: 10.1109/TGRS.2002.800274
- Khoda O, Bruyninx C (2009) Switching from relative to absolute antenna phase center variations in a regional network: stability of the coordinate differences. In: EUREF Publication No. 17 (verfügbar unter http://www.epncb.oma.be/_newsmails/papers/)
- Kleijer F (2004) Troposphere modeling and filtering for precise GPS leveling. *Publications on Geodesy* 56, Netherlands Geodetic Commission (verfügbar unter <http://www.ncg.knaw.nl/Publicaties/Geodesy/pdf/56Kleijer.pdf>)
- Klein G, Klette M (2005) Monitoring der SAPOS-Stationen in Bayern. *Mitteilungen des DVW Bayern* 57(3): 401-424
- Kopeikin S, Petrov L (2001) Draft of Chapter 12 (General relativistic models for propagation) of the IERS Conventions. (verfügbar unter http://gemini.gsfc.nasa.gov/pet/discussion/VLBI_delay/alt_ch12.ps)
- Kouba J (2003) A guide to using International GPS Service (IGS) products. IGS Central Bureau, Pasadena (verfügbar unter <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf>)
- Koyama Y, Heki K, Takahashi Y, Furuya M (1999) KSP VLBI system: data analysis system - data analysis software. *Journal of the Communications Research Laboratory* 46(1): 77-81
- Krügel M, Tesmer V, Angermann D, Thaller D, Rothacher M, Schmid R (2004) CONT02 campaign - combination of VLBI and GPS. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) *Proc IVS 2004 General Meeting*, Ottawa, NASA/CP-2004-212255, pp 418-422
- Krügel M, Thaller D, Tesmer V, Rothacher M, Angermann D, Schmid R (2007) Tropospheric parameters: combination studies based on homogeneous VLBI and GPS data. *J Geod* 81(6-8): 515-527, DOI: 10.1007/s00190-006-0127-8
- Langley RB (1998) A primer on GPS antennas. *GPS World* 9(7): 50-54
- Letellier T (2004) *Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux*. Thèse doctorale, Université de Toulouse III
- Lidberg M, Johansson JM, Scherneck H-G, Davis JL (2007) An improved and extended GPS-derived 3D velocity field of the glacial isostatic adjustment (GIA) in Fennoscandia. *J Geod* 81(3): 213-230, DOI: 10.1007/s00190-006-0102-4
- Liu X, Tiberius C, de Jong K (2004) Modelling of differential single difference receiver clock bias for precise positioning. *GPS Sol* 7(4): 209-221, DOI: 10.1007/s10291-003-0079-x
- Luzum BJ, Ray JR, Carter MS, Josties FJ (2001) Recent improvements to IERS Bulletin A combination and prediction. *GPS Sol* 4(3): 34-40, DOI: 10.1007/PL00012853
- Ma C, Arias EF, Eubanks TM, Fey AL, Gontier A-M, Jacobs CS, Sovers OJ, Archinal BA, Charlot P (1998) The International Celestial Reference Frame as realized by very long baseline interferometry. *Astron J* 116(1): 516-546, DOI: 10.1086/300408
- MacMillan D, Behrend D, Gordon D, Ma Ch (2006) First results from CONT05. In: Behrend D, Baver K (eds) *Proc IVS 2006 General Meeting*, Concepción, NASA/CP-2006-214140, pp 269-273

- Mader GL, MacKay JR (1996) Calibration of GPS antennas. In: Neilan RE, Van Scoy PA, Zumberge JF (eds) Proc IGS 1996 Workshop, Silver Spring, pp 81-105
- Mader GL (1999) GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Sol* 3(1): 50-58, DOI: 10.1007/PL00012780
- Mader GL, Czopek FM (2002) The Block IIA satellite - calibrating antenna phase centers. *GPS World* 13(5): 40-46
- Marini JW (1972) Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Science* 7(2): 223-231
- Marquis W, Reigh D (2005) On-orbit performance of the improved GPS Block IIR antenna panel. In: Proc ION-GNSS05, Long Beach, pp 2418-2426
- Mathews PM, Herring TA, Buffett BA (2002) Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior. *J Geophys Res* 107(B4), 2068, DOI: 10.1029/2001JB000390
- Mayer M (2002) GPS-Antennenkalibrierung. In: Heck B, Illner M (eds) GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmungen und RTK-Anwendungen. 57. DVW-Seminar, Karlsruhe, 16.-17. September 2002, DVW-Schriftenreihe, Band 44, Wittwer, pp 118-134
- McCarthy DD (ed, 1992) IERS Standards. IERS Technical Note, No. 13
- McCarthy DD (ed, 1996) IERS Conventions (1996). IERS Technical Note, No. 21
- McCarthy DD, Petit G (eds, 2004) IERS Conventions (2003). IERS Technical Note, No. 32
- Meindl M, Schaer S, Hugentobler U, Beutler G (2004) Tropospheric gradient estimation at CODE: results from global solutions. *J Meteorological Society of Japan* 82(1B): 331-338, DOI: 10.2151/jmsj.2004.331
- Mendes VB, Langley RB (1994) A comprehensive analysis of mapping functions used in modeling tropospheric propagation delay in space geodetic data. In: Proc International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, pp 87-98 (verfügbar unter <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/kis94.pdf>)
- Mendes VB, Langley RB (2000) An analysis of high-accuracy tropospheric delay mapping functions. *Phys Chem Earth(A)* 25(12): 809-812, DOI: 10.1016/S1464-1895(01)00011-4
- Mendes Cerveira PJ, Boehm J, Tanir E, Wresnik J, Schuh H, Tesmer V (2007) Datum deficiency in VLBI analysis: case study of session 021020XA. In: Boehm J, Pany A, Schuh H (eds) Proc 18th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Nr. 79, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, TU Wien
- Menge F, Seeber G, Voelksen C, Wuebbena G, Schmitz M (1998) Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV. In: Proc ION-GPS98, Nashville, pp 31-38
- Menge F, Seeber G (2000) Untersuchungen und Beiträge zur Problematik der Phasenzentrumsvariationen von GPS Antennen. In: Dietrich R (ed) Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 1995–1998, DGK B310, München, pp 181-194
- Menge F (2003) Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 247
- Meyer U, Charlot P, Biancale R (2000) GINS: a new multi-technique software for VLBI analysis. In: Vandenberg NR, Bayer KD (eds) Proc IVS 2000 General Meeting, Kötzing, NASA/CP-2000-209893, pp 324-328
- Montenbruck O, Gill E (2000) Satellite orbits: models, methods, applications. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Montenbruck O, Garcia-Fernandez M, Yoon Y, Schön S, Jäggi A (2009) Antenna phase center calibration for precise positioning of LEO satellites. *GPS Sol* 13(1): 23-34, DOI: 10.1007/s10291-008-0094-z
- Montaguti S, Vittuari L, Sarti P, Negusini M (2007) Medicina and Noto VLBI radiotelescopes: gravitational deformations evaluated with terrestrial laser scanning. In: Boehm J, Pany A, Schuh H (eds) Proc 18th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Nr. 79, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, TU Wien
- Moore AW (2006) IGS site guidelines. IGS Central Bureau, Pasadena (verfügbar unter http://igs.cb.jpl.nasa.gov/network/guide_igs.html)
- Moyer TD (1981) Transformation from proper time on Earth to coordinate time in solar system barycentric space-time frame of reference. *Celestial Mechanics* 23(1): 33-56, DOI: 10.1007/BF01228543
- Müller J (1991) Analyse von Lasermessungen zum Mond im Rahmen einer post-Newton'schen Theorie. DGK Reihe C, Heft 383, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München

- Müller J, Soffel M, Klioner SA (2008) Geodesy and relativity. *J Geod* 82(3): 133-145, DOI: 10.1007/s00190-007-0168-7
- NASA Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board (MCO MIB) (2000) Report on Project Management in NASA. National Aeronautics and Space Administration, Washington (verfügbar unter ftp://ftp.hq.nasa.gov/pub/pao/reports/2000/MCO_MIB_Report.pdf)
- Navstar GPS Joint Program Office (2006) Navstar GPS space segment/navigation user interfaces (IS-GPS-200, Revision D). Interface specification, El Segundo (verfügbar unter <http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/>)
- Niell A (1996) Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *J Geophys Res* 101(B2): 3227-3246, DOI: 10.1029/95JB03048
- Niell A (2000) Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. *Earth Planets Space* 52(10): 699-702
- Niell A, Whitney A, Petrachenko B, Schlüter W, Vandenberg N, Hase H, Koyama Y, Ma C, Schuh H, Tuccari G (2005) VLBI2010: current and future requirements for geodetic VLBI systems. Report of Working Group 3 to the IVS Directing Board, IVS Memorandum 2006-008v01 (verfügbar unter <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/memos/ivs-2006-008v01.pdf>)
- Nothnagel A (1991) Radiointerferometrische Beobachtungen zur Bestimmung der Polbewegung unter Benutzung langer Nord-Süd-Basislinien. DGK Reihe C, Heft 368, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/Main
- Nothnagel A (2000) Der Einfluss des Wasserdampfes auf die modernen raumgestützten Messverfahren. *Mitteilungen des BKG*, Band 16, Verlag des BKG, Frankfurt/Main
- Nothnagel A (2003) VTRF2003: A conventional VLBI Terrestrial Reference Frame. In: Schwegmann W, Thorandt V (eds) Proc 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt/Leipzig, pp 195-205
- Nothnagel A, Cho J, Roy A, Haas R (2007) WVR calibration applied to European VLBI observing sessions. In: Tregoning P, Rizos C (eds) Dynamic planet - Monitoring and understanding a dynamic planet with geodetic and oceanographic tools. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 130, Springer, Berlin Heidelberg, pp 152-157, DOI: 10.1007/978-3-540-49350-1_24
- Pearlman MR, Degnan JJ, Bosworth JM (2002) The International Laser Ranging Service. *Adv Space Res* 30(2): 135-143, DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00277-6
- Pérez-Torres MA, Marcaide JM, Guirado JC, Ros E, Shapiro II, Ratner MI, Sardón E (2000) Towards global phase-delay VLBI astrometry: observations of QSO 1150+812 and BL 1803+784. *Astron Astrophys* 360(1): 161-170
- Petrachenko B, Corey B, Himwich E, Ma C, Malkin Z, Niell A, Shaffer D, Vandenberg N (2004) IVS-WG3 report on observing strategies. IVS Memorandum 2006-001v01 (verfügbar unter <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/memos/ivs-2006-001v01.pdf>)
- Petrov L (1999) Specifications of a proposed geo-VLBI data format. (verfügbar unter <http://gemini.gsfc.nasa.gov/development/gvf/gvf.html>)
- Petrov L, Boy J-P (2004) Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. *J Geophys Res* 109(B3), B03405, DOI: 10.1029/2003JB002500
- Píriz R, Fernández V, Auz A, Tavella P, Sesia I, Cerretto G, Falcone M, Navarro D, Hahn J, González F, Tossaint M, Gandara M (2006) The Galileo System Test Bed V2 for orbit and clock modeling. In: Proc ION-GNSS06, Fort Worth, pp 549-562
- Plag H-P (2008) GEO, GEOSS and IGOS-P: The framework of global Earth observations. In: Springer T, Gendt G, Dow JM (eds) Proc IGS 2006 Workshop, Darmstadt
- Ray J, Dong D, Altamimi Z (2004) IGS reference frames: status and future improvements. *GPS Sol* 8(4): 251-266, DOI: 10.1007/s10291-004-0110-x
- Ray J, Altamimi Z (2005) Evaluation of co-location ties relating the VLBI and GPS reference frames. *J Geod* 79(4-5): 189-195, DOI: 10.1007/s00190-005-0456-z
- Ray J, Crump D, Chin M (2007) New global positioning system reference station in Brazil. *GPS Sol* 11(1): 1-10, DOI: 10.1007/s10291-006-0032-x
- Rees MJ (1978) Accretion and the quasar phenomenon. *Physica Scripta* 17(3): 193-200, DOI: 10.1088/0031-8949/17/3/010
- Rogers G, Dragert H (2003) Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: the chatter of silent slip. *Science* 300(5627): 1942-1943, DOI: 10.1126/science.1084783

- Rothacher M, Schaer S, Mervart L, Beutler G (1995) Determination of antenna phase center variations using GPS data. In: Gendt G, Dick G (eds) Proc IGS 1995 Workshop, Potsdam, pp 205-220
- Rothacher M, Mader G (1996) Combination of antenna phase center offsets and variations. IGS Central Bureau, Pasadena (verfügbar unter ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/igs_01.txt)
- Rothacher M (2001) Comparison of absolute and relative antenna phase center variations. GPS Sol 4(4): 55-60, DOI: 10.1007/PL00012867
- Rothacher M (2002) Combination of space-geodetic techniques. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) Proc IVS 2002 General Meeting, Tsukuba, pp 33-43
- Rothacher M, Schmid R (2002) GPS-Antennenkalibrierungen aus nationaler und internationaler Sicht. In: Jahn CH, Urban J (eds) Tagungsband des 4. SAPOS-Symposiums, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), Hannover, pp 124-131 (verfügbar unter <http://www.sapos.de/pdf/4symposium/124-131.pdf>)
- Rothacher M (2003) Towards a rigorous combination of space geodetic techniques. In: Richter B, Schwegmann W, Dick WR (eds) Proc IERS Workshop on combination research and global geophysical fluids, IERS Technical Note 30, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, pp 7-18
- Rothacher M, Mader G (2003) Receiver and satellite antenna phase center offsets and variations. In: Tetreault P, Neilan R, Gowey K (eds) Proc IGS 2002 Network, Data and Analysis Centre Workshop, Ottawa, pp 141-152
- Rothacher M, Schmid R (2006) ANTEX: The antenna exchange format version 1.3. Format specification, IGS Central Bureau, Pasadena (verfügbar unter <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/antex13.txt>)
- Rothacher M, Drewes H, Nothnagel A, Richter B (2007) Integration of space geodetic techniques as the basis for a Global Geodetic-Geophysical Observing System (GGOS-D): an overview. In: Stroink L (ed) Geotechnologien Science Report No. 11, Koordinierungsbüro Geotechnologien, Potsdam, pp 75-79 (verfügbar unter http://www.geotechnologien.de/Download/pdf/Science_Report/SR11.pdf)
- Rummel R, Drewes H, Bosch W, Hornik H (eds, 2000) Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS). International Association of Geodesy Symposia, Vol. 120, Springer, Heidelberg, pp 1-261
- Rummel R, Rothacher M, Beutler G (2005) Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS) — science rationale. J Geodyn 40(4-5): 357-362, DOI: 10.1016/j.jog.2005.06.003
- Saastamoinen J (1973) Contributions to the theory of atmospheric refraction. Bull Géod 107: 13-34, DOI: 10.1007/BF02522083
- Schaer S (2005) GLONASS MW antenna offset values. IGSMail-5151, IGS Central Bureau, Pasadena
- Schlüter W, Himwich E, Nothnagel A, Vandenberg N, Whitney A (2002) IVS and its important role in the maintenance of the global reference systems. Adv Space Res 30(2): 145-150, DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00278-8
- Schlüter W, Behrend D (2007) The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): current capabilities and future prospects. J Geod 81(6-8): 379-387, DOI: 10.1007/s00190-006-0131-z
- Schmid R, Rothacher M (2002) Ergebnisse und Analyse des Vergleichstests von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen. In: Campbell J, Seeber G (eds) Proc 4. GPS-Antennenworkshop, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Hannover (verfügbar unter http://www.sapos.de/pdf/4aws/AWS02_V06.pdf)
- Schmid R, Rothacher M (2003) Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. J Geod 77(7-8): 440-446, DOI: 10.1007/s00190-003-0339-0
- Schmid R, Mader G, Herring T (2005a) From relative to absolute antenna phase center corrections. In: Meindl M (ed) Proc IGS 2004 Workshop and Symposium, Bern, pp 209-219
- Schmid R, Rothacher M, Thaller D, Steigenberger P (2005b) Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas: impact on global GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna. GPS Sol 9(4): 283-293, DOI: 10.1007/s10291-005-0134-x
- Schmid R, Steigenberger P, Gendt G, Ge M, Rothacher M (2007) Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas. J Geod 81(12): 781-798, DOI: 10.1007/s00190-007-0148-y
- Schmidt M (1963) 3C 273: a star-like object with large red-shift. Nature 197: 1040, DOI: 10.1038/1971040a0
- Schmitz M, Wübbena G, Boettcher G (2002) Tests of phase center variations of various GPS antennas, and some results. GPS Sol 6(1-2): 18-27, DOI: 10.1007/s10291-002-0008-4
- Schuh H (1987) Die Radiointerferometrie auf langen Basen zur Bestimmung von Punktverschiebungen und Erdrotationsparametern. DGK Reihe C, Heft 328, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München

- Schuh H, Nagel S, Seitz T (2001) Linear drift and periodic variations observed in long time series of polar motion. *J Geod* 74(10): 701-710, DOI: 10.1007/s001900000133
- Schuh H, Boehm J (2003) Determination of tropospheric parameters within the new IVS Pilot Project. In: Schwegmann W, Thorandt V (eds) Proc 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt/Leipzig, pp 257-264
- Schuh H, Boehm J, Bolotin S, Capallo R, Elgered G, Engelhardt G, Haas R, Hanada H, Hobiger T, Ichikawa R, Klioner S, Ma C, MacMillan D, Malkin Z, Matsuzaka S, Niell A, Nothnagel A, Schwegmann W, Sovers O, Tesmer V, Titov O (2004) IVS-WG3 report on data analysis. IVS Memorandum 2006-006v01 (verfügbar unter <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/memos/ivs-2006-006v01.pdf>)
- Schupler BR, Clark TA (1991) How different antennas affect the GPS observable. *GPS World* 2(10): 32-36
- Schupler BR, Clark TA (2000) High accuracy characterization of geodetic GPS antennas using anechoic chamber and field tests. In: Proc ION-GPS00, Salt Lake City, pp 2499-2505
- Schupler BR (2001) The response of GPS antennas - How design, environment and frequency affect what you see. *Phys Chem Earth (A)* 26(6-8): 605-611, DOI: 10.1016/S1464-1895(01)00109-0
- Seitz F (2004) Atmosphärische und ozeanische Einflüsse auf die Rotation der Erde. DGK Reihe C, Heft 578, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
- Sims ML (1985) Phase center variation in the geodetic TI4100 GPS receiver system's conical spiral antenna. In: Proc 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, pp 227-244
- Sovers OJ, Fanselow JL, Jacobs CS (1998) Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Reviews of Modern Physics* 70(4): 1393-1454, DOI: 10.1103/RevModPhys.70.1393
- Sovers OJ, Charlot P, Fey AL, Gordon D (2002) Structure corrections in modeling VLBI delays for RDV data. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) Proc IVS 2002 General Meeting, Tsukuba, pp 243-247
- Sovers OJ, Jacobs CS, Lanyi GE (2004) MODEST: a tool for geodesy and astrometry. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) Proc IVS 2004 General Meeting, Ottawa, NASA/CP-2004-212255, pp 272-276
- Springer TA (2000a) Modeling and validating orbits and clocks using the global positioning system. *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, 60, Schweizerische Geodätische Kommission
- Springer TA (2000b) Common interests of the IGS and the IVS. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) Proc IVS 2000 General Meeting, Kötzing, NASA/CP-2000-209893, pp 296-305
- Standish EM (1998) JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405. JPL Interoffice Memorandum 312.F-98-048 (verfügbar unter <http://iau-comm4.jpl.nasa.gov/de405iom/de405iom.pdf>)
- Steigenberger P, Rothacher M, Dietrich R, Fritsche M, Rülke A, Vey S (2006) Reprocessing of a global GPS network. *J Geophys Res* 111(B5), B05402, DOI: 10.1029/2005JB003747
- Steigenberger P, Tesmer V, Krügel M, Thaller D, Schmid R, Vey S, Rothacher M (2007) Comparisons of homogeneously reprocessed GPS and VLBI long time-series of troposphere zenith delays and gradients. *J Geod* 81(6-8): 503-514, DOI: 10.1007/s00190-006-0124-y
- Steigenberger P, Romero I, Fang P (2008) Reprocessing issues, standardization, new models. In: Springer T, Gendt G, Dow JM (eds) Proc IGS 2006 Workshop, Darmstadt
- Steigenberger P, Rothacher M, Schmid R, Rülke A, Fritsche M, Dietrich R, Tesmer V (2009) Effects of different antenna phase center models on GPS-derived reference frames. In: Proc GRF 2006, München
- Tavernier G, Fagard H, Feissel-Vernier M, Le Bail K, Lemoine F, Noll C, Noomen R, Ries JC, Soudarin L, Valette JJ, Willis P (2006) The International DORIS Service: genesis and early achievements. *J Geod* 80(8-11): 403-417, DOI: 10.1007/s00190-006-0082-4
- Tesmer V (2004) Das stochastische Modell bei der VLBI-Auswertung. DGK Reihe C, Heft 573, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
- Thaller D, Krügel M, Rothacher M, Angermann D, Schmid R, Tesmer V (2005a) Combination studies using the CONT02 campaign. In: Behrend D, Baver K (eds) International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 Annual Report, pp 13-21
- Thaller D, Schmid R, Rothacher M, Tesmer V, Angermann D (2005b) Towards a rigorous combination of VLBI and GPS using the CONT02 campaign. In: Sansö F (ed) A window on the future of geodesy. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 128, Springer, Berlin Heidelberg, pp 576-581, DOI: 10.1007/3-540-27432-4_98

- Thaller D, Dill R, Krügel M, Steigenberger P, Rothacher M, Tesmer V (2006) CONT02 analysis and combination of long EOP series. In: Flury J, Rummel R, Reigber Ch, Rothacher M, Boedecker G, Schreiber U (eds) Observation of the Earth system from space. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 389-411, DOI: 10.1007/3-540-29522-4_26
- Thaller D, Krügel M, Rothacher M, Tesmer V, Schmid R, Angermann D (2007) Combined Earth orientation parameters based on homogeneous and continuous VLBI and GPS data. *J Geod* 81(6-8): 529-541, DOI: 10.1007/s00190-006-0115-z
- Thaller D (2008) Inter-technique combination based on homogeneous normal equation systems including station coordinates, Earth orientation and troposphere parameters. Scientific Technical Report STR 08/15, Deutsches GeoForschungs-Zentrum, Potsdam
- Thomas CC, MacMillan DS (2003) CORE operation center report. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) IVS 2002 Annual Report, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, NASA/TP-2003-211619, pp 179-181
- Titov O, Tesmer V, Böhm J (2001) OCCAM 5.0 users guide. AUSLIG Technical Report 7, Australian Surveying and Land Information Group, Canberra (verfügbar unter http://www.ga.gov.au/image_cache/GA5029.pdf)
- Titov O, Tesmer V, Boehm J (2004) OCCAM v.6.0 software for VLBI data analysis. In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) Proc IVS 2004 General Meeting, Ottawa, NASA/CP-2004-212255, pp 267-271
- Tornatore V, Charlot P (2007) The impact of radio source structure on European geodetic VLBI measurements. *J Geod* 81(6-8): 469-478, DOI: 10.1007/s00190-007-0146-0
- Tóth G (2007) IAG Newsletter. *J Geod* 81(11): 751-757, DOI: 10.1007/s00190-007-0188-3
- Urschl C, Gurtner W, Hugentobler U, Schaer S, Beutler G (2005) Validation of GNSS orbits using SLR observations. *Adv Space Res* 36(3): 412-417, DOI: 10.1016/j.asr.2005.03.021
- Urschl C, Beutler G, Gurtner W, Hugentobler U, Schaer S (2007) GPS/GLONASS orbit determination based on combined microwave and SLR data analysis. In: Tregoning P, Rizos C (eds) Dynamic planet - Monitoring and understanding a dynamic planet with geodetic and oceanographic tools. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 130, Springer, Berlin Heidelberg, pp 115-122, DOI: 10.1007/978-3-540-49350-1_19
- Urschl C, Beutler G, Gurtner W, Hugentobler U, Schaer S (2008) Validation of GNSS orbits using SLR observations. In: Springer T, Gendt G, Dow JM (eds) Proc IGS 2006 Workshop, Darmstadt
- Valle P, Zolesi M, Netti A, Rosa A, Pantano A, Bandinelli M, Guidi R (2003) The design, modeling and development of WRAS antenna for GALILEOSAT. In: Proc 26th ESA Antenna Technology Workshop, Noordwijk (verfügbar unter http://www.idscompany.it/upload7/File/design__modelling.pdf)
- van Dam T, Wahr J, Milly PCD, Shmakin AB, Blewitt G, Lavallée D, Larson KM (2001) Crustal displacements due to continental water loading. *Geophys Res Lett* 28(4): 651-654, DOI: 10.1029/2000GL012120
- Vennebusch M, Böckmann S, Nothnagel A (2007) The contribution of very long baseline interferometry to ITRF2005. *J Geod* 81(6-8): 553-564, DOI: 10.1007/s00190-006-0117-x
- Vermeer M (2007) Advanced adjustment theory. Lecture notes, Helsinki University of Technology (verfügbar unter http://users.tkk.fi/~mvermeer/tasj_en.pdf)
- Völksen C (2006) The importance of correct antenna calibration models for the EUREF Permanent Network. In: Torres JA, Hornik H (eds) Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Mitteilungen des BKG, Band 38, Verlag des BKG, Frankfurt/Main, pp 73-78
- Wahr JM (1981) Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth. *Geophys J Roy astr Soc* 64(3): 677-703, DOI: 10.1111/j.1365-246X.1981.tb02690.x
- Wanninger L, Rost Ch, Hartlieb G, Köhr M (2006) Zur Problematik des Antennenwechsels auf GNSS-Referenzstationen. *zfv* 131(4): 171-175
- Watson C, Tregoning P, Coleman R (2006) Impact of solid Earth tide models on GPS coordinate and tropospheric time series. *Geophys Res Lett* 33(8), L08306, DOI: 10.1029/2005GL025538
- Whitford M (2005) GPS World antenna survey 2005. *GPS World* 16(2): 36-48
- Whitney AR (2000) How do VLBI correlators work? In: Vandenberg NR, Baver KD (eds) Proc IVS 2000 General Meeting, Kötzing, NASA/CP-2000-209893, pp 187-205
- Willis P, Desai SD, Bertiger WI, Haines BJ, Auriol A (2005) DORIS satellite antenna maps derived from long-term residuals time series. *Adv Space Res* 36(3): 486-497, DOI: 10.1016/j.asr.2005.03.095
- Willis P, Haines BJ, Kuang D (2007) DORIS satellite phase center determination and consequences on the derived scale of the Terrestrial Reference Frame. *Adv Space Res* 39(10): 1589-1596, DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.007

- Wübbena G, Schmitz M, Menge F, Seeber G, Völksen Ch (1997) A new approach for field calibration of absolute antenna phase center variations. *J Inst Navigation* 44(2): 247-256
- Wübbena G, Schmitz M, Menge F, Böder V, Seeber G (2000) Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time. In: *Proc ION-GPS00*, Salt Lake City, pp 2512-2522
- Wübbena G, Schmitz M, Boettcher G (2003) Zum Einfluss des Antennennahfeldes. Presented at the 5th GPS Antenna Workshop, Frankfurt/Main (verfügbar unter http://www.sapos.de/pdf/5aws/Schmitz_AWS03.pdf)
- Wübbena G, Schmitz M, Mader G, Czopek F (2007) GPS Block II/IIA satellite antenna testing using the automated absolute field calibration with robot. In: *Proc ION-GNSS07*, Fort Worth, pp 1236-1243
- Wübbena G, Schmitz M, Boettcher G, Schumann Ch (2008) Absolute GNSS antenna calibration with a robot: repeatability of phase variations, calibration of GLONASS and determination of carrier-to-noise pattern. In: Springer T, Gendt G, Dow JM (eds) *Proc IGS 2006 Workshop*, Darmstadt
- Yaya P (2002) Apport des combinaisons de techniques astrométriques et géodésiques à l'estimation des paramètres d'orientation de la Terre. Thèse de doctorat, Observatoire de Paris
- Zandbergen R, Navarro D (2006) Specification of Galileo and GIOVE space segment properties relevant for satellite laser ranging. ESA Technical Note, ESA-EUING-TN/10206 (verfügbar unter http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/ESA-EUING-TN-10206_Issue_3.0.pdf)
- Zeimetz P, Kuhlmann H (2006) Systematic effects in absolute chamber calibration of GPS antennas. *Geomatica* 60(3): 267-274, Canadian Institute of Geomatics
- Zeller G, Soffel M, Ruder H, Schneider M (1986) Relativistische Effekte bei der Laufzeitdifferenz der VLBI. In: Schneider M (ed) *Die Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 78 Satellitengeodäsie der Technischen Universität München 1984 und 1985*. Veröffentlichungen der BEK, Heft 48, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, pp 218-236
- Zhu SY, Reigber C, Kang Z (1997) Apropos laser tracking to GPS satellites. *J Geod* 71(7): 423-431, DOI: 10.1007/s001900050110
- Zhu SY, Massmann F-H, Yu Y, Reigber C (2003a) Satellite antenna phase center offsets and scale errors in GPS solutions. *J Geod* 76(11-12): 668-672, DOI: 10.1007/s00190-002-0294-1
- Zhu S, Reigber C, Massmann F-H, Neumayer H, Meixner H, Flechtner F (2003b) Combination of multi-satellite techniques at the observation level. In: Richter B, Schwegmann W, Dick WR (eds) *Proc IERS Workshop on combination research and global geophysical fluids*, IERS Technical Note 30, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, pp 84-86
- Zhu S, Reigber C, König R (2004) Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data. *J Geod* 78(1-2): 103-108, DOI: 10.1007/s00190-004-0379-0
- Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, Watkins MM, Webb FH (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J Geophys Res* 102(B3): 5005-5017, DOI: 10.1029/96JB03860

Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AIPS	Astronomical Image Processing System
AIUB	Astronomisches Institut der Universität Bern
ANTEX	Antenna Exchange Format
AOAD/M	Allen Osborne Associates Dorne Margolin
APKIM	Actual Plate Kinematic Model
ARP	Antenna Reference Point
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AUSLIG	Australian Surveying and Land Information Group
AZEL	Azimuth/Elevation mount (Altazimut-Teleskopmontierung)
BIFROST	Baseline Inferences for Fennoscandian Rebound Observations, Sea-Level, and Tectonics
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
C04	Combined 04
CASA	Construcciones Aeronáuticas S.A.
CATREF	Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames
CDP	Crustal Dynamics Project
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload
CIO	Celestial Intermediate Origin
CM	Center of Mass
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CONT02	Continuous VLBI Campaign 2002
CONT05	Continuous VLBI Campaign 2005
CORE	Continuous Observations of the Rotation of the Earth
CRF	Celestial Reference Frame
DBH	Database Handler
DD	Double Difference
DExxx	Development Ephemeris xxx
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
DGK	Deutsche Geodätische Kommission
DOGS-CS	DGFI Orbit and Geodetic Parameter Estimation Software – Combination and Solution
DOI	Digital Object Identifier
DOMES	Directory of MERIT Sites
DORIS	Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite
DOY	Day Of Year
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EDM	Elektronische Distanzmessung
EOE	Edge of Earth
EOP	Earth Orientation Parameters
EPN	EUREF Permanent GNSS Network
EPOS	Earth Parameters and Orbit Determination System
EPOS-OC	EPOS – Orbit Computation
EQUA	Equatorial mount (Äquatoriale Teleskopmontierung)
ERDE	Extended Research and Development Experiment
ERP	Earth Rotation Parameters
ESA	European Space Agency
EUREF	IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe
EVGA	European VLBI Group for Geodesy and Astrometry
EVN	European VLBI Network
FESG	Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie
FESyyyy	global tide Finite Element Solution yyyy
FFI	Forsvarets Forskningsinstitutt (Norwegian Defence Research Establishment)
FITS	Flexible Image Transport System

GAMIT	GPS at MIT
GEO	Group on Earth Observations
GEONET	GPS Earth Observation Network
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GGOS	Global Geodetic Observing System
GGOS-D	Global Geodetic-Geophysical Observing System – Deutschland
GIA	Glacial Isostatic Adjustment
GINS	Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
GIUB	Institut für Geodäsie und Geoinformation der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
GLOBK	Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GLORIA	Global Radio Interferometry Analysis
GMF	Global Mapping Function
GMST	Greenwich Mean Sidereal Time
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
GPT	Global Pressure and Temperature
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRGS	Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale
GSFC	Goddard Space Flight Center
GST	Greenwich Apparent/True Sidereal Time
GVF	Geo-VLBI Format
HADEC	Hour Angle/Declination mount (Äquatoriale Teleskopmontierung)
HALCA	Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy
IAG	International Association of Geodesy
IAPG	Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
IAU	International Astronomical Union
ICRF/ICRS	International Celestial Reference Frame/System
IDI	Interferometry Data Interchange Format
IDS	International DORIS Service
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGb00	IGS-Realisierung des ITRF2000
IGGOS	Integrated Global Geodetic Observing System
IGOS	Integrated Global Observing Strategy
IGOS-P	IGOS Partnership
IGS	International GNSS Service
ILRS	International Laser Ranging Service
IMF	Isobaric Mapping Function
INT1	<i>Intensive-VLBI-Beobachtungsreihe Wettzell – Kokee Park</i>
INT2	<i>Intensive-VLBI-Beobachtungsreihe Wettzell – Tsukuba</i>
ION	Institute of Navigation
IPWV	Integrated Precipitable Water Vapor
ITRF/ITRS	International Terrestrial Reference Frame/System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
IWV	Integrated Water Vapor
JPL	Jet Propulsion Laboratory
JPO	Joint Program Office
KSP	Key Stone Project
LEIC	Leica dome, conical shape
LEO	Low Earth Orbiter
LGN	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
LLR	Lunar Laser Ranging
LOD	Length of Day
MCO MIB	Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board
MERIT	Monitoring of Earth Rotation and Intercomparison of the Techniques of Observation and Analysis
MHB2000	Nutationsmodell von Mathews, Herring & Buffett (Mathews et al., 2002)

MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJD	Modified Julian Date
MODEST	Model Estimate
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging
NDRE	Norwegian Defence Research Establishment
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NGS	National Geodetic Survey
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NMF	Niell (1996) Mapping Function
NNR	No-Net-Rotation
NNT	No-Net-Translation
NRCan	Natural Resources Canada
NUVEL	Northwestern University Velocity Model
OCS	GPS Operational Control Segment
OSO	Onsala Space Observatory
PC	Phase Center (Phasenzentrum)
PCAL	Phase Calibration
PCO	Phase Center Offset (Phasenzentrumsoffset)
PCV	Phase Center Variation (Phasenzentrumsvariation)
PIVEX	Platform-Independent VLBI Exchange Format
ppb	parts per billion
PPN	parameterized post-Newtonian
PPP	Precise Point Positioning
PRARE	Precise Range and Range-Rate Equipment
PRN	Pseudo-Random Noise
quasar	quasi-stellar radio source
radome	radar dome
RDV	Research and Development (sessions) with the VLBA
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Root Mean Square
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBL	Special Bureau for Loading
SCEC	Southern California Earthquake Center
SCIGN	Southern California Integrated GPS Network
SCIS	SCIGN short antenna dome
SD	Single Difference
SGF	Space Geodesy Facility
SINEX	Solution (software/technique) Independent Exchange Format
SIO	Scripps Institution of Oceanography
SLR	Satellite Laser Ranging
SVN	Space Vehicle Number
TCWV	Total Column Water Vapor
TRF	Terrestrial Reference Frame
TT	Terrestrial Time
TUD	Technische Universität Dresden
TUM	Technische Universität München
TZD	Tropospheric Zenith Delay (Troposphärische Verzögerung in Zenitrichtung)
UNAVCO	University NAVSTAR Consortium
USNO	United States Naval Observatory
UTC	Universal Time Coordinated
UT1	Universal Time 1
VLBA	Very Long Baseline Array
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VMF	Vienna Mapping Function
VSOP	VLBI Space Observatory Programme
VTRF	VLBI Terrestrial Reference Frame
WRAS	Wideband Radiator Antenna Subsystem
WRMS	Weighted Root Mean Square

WVR	Water Vapor Radiometer (Wasserdampfradiometer)
X-YE	X-Y mount directed East-West (X-Y-Teleskopmontierung in Ost-West-Ausrichtung)
X-YN	X-Y mount directed North-South (X-Y-Teleskopmontierung in Nord-Süd-Ausrichtung)
ZD	Zero Difference

Dank

Besonderer Dank gebührt Markus Rothacher und Urs Hugentobler, die trotz eines übervollen Terminkalenders immer wieder Zeit für wertvolle Diskussionen fanden, aus denen stets neue Ideen hervorgingen. Wenn auch oft nur kleine Anstöße nötig waren, um einen Ausweg aus scheinbaren Sackgassen zu finden, so war diese Unterstützung für das Gelingen der Arbeit doch unerlässlich.

Den Einstieg in den Themenkomplex der Kombination geodätischer Raumverfahren erleichterte die Mitarbeit in einer Projektgruppe bestehend aus DGFI- und FESG-Kollegen. Die Arbeitstreffen mit Daniela Thaller, Manuela Seitz, Volker Tesmer, Detlef Angermann und Markus Rothacher konnten bereits früh einen Eindruck vom Nutzen der Kombination liefern. Dieses Wissen um das große Ganze half über so manche Durststrecke beim Implementieren der VLBI-Algorithmen in die *Bernese GPS Software* hinweg. Besonderer Dank geht an Volker Tesmer für das Prozessieren der zum Vergleich herangezogenen OCCAM-Lösung sowie an Daniela Thaller für die Überlassung einer größeren Menge an Vergleichsdaten und entsprechenden Analyseprogrammen.

Einige Schwierigkeiten bei der Interpretation der theoretischen Modelle (Vorzeichen & Co. lassen grüßen!) wären ohne die Hilfe weiterer OCCAM-Kollegen nur schwer zu lösen gewesen. Johannes Boehm und Joerg Wresnik von der TU Wien konnten durch das Bereitstellen von „Soll-Zwischenresultaten“ einige Male beim Lokalisieren von Software-Problemen behilflich sein. Herzlichen Dank hierfür!

Auch die Durchsetzung des absoluten GNSS-Phasenzentrumsmodells auf internationaler Ebene wäre nicht ohne Teamwork möglich gewesen. Erst die von Peter Steigenberger geschaffene Möglichkeit zur konsistenten Neuverarbeitung aller IGS-Beobachtungsdaten erlaubte es, Korrekturwerte für alle aus heutiger Sicht relevanten GPS-Satelliten zu ermitteln. Daneben wäre ohne die enge Zusammenarbeit mit Maorong Ge und Gerd Gendt vom GFZ und die damit verbundene Bestätigung der Resultate durch ein unabhängiges Analysezentrum wohl kaum internationale Akzeptanz zu erreichen gewesen. Andreas Gäde, Stefan Schaer und Kollegen vom AIUB komplettierten das Modell schließlich durch Schätzung von Korrekturwerten für die GLONASS-Satelliten. Mein Dank geht an alle Genannten sowie an Markus Rothacher, der den Anstoß für diese Arbeiten gab.

Bedanken möchte ich mich darüberhinaus bei der Firma Geo++ GmbH für die Bereitstellung absoluter Roboterkalibrierungen sowie bei IGS, IVS und allen an diesen Diensten beteiligten Institutionen für die globalen Beobachtungsdaten. Grundvoraussetzung für alle Arbeiten war daneben natürlich das verwendete Softwarepaket. Nur durch die Vorarbeit zahlreicher Kollegen, vor allem vom AIUB, war ich in der Lage, der *Bernese GPS Software* einige kleine Bausteine hinzufügen zu können.

Zuguterletzt gilt mein Dank allen Kollegen vom IAPG für das angenehme Arbeitsklima und das freundliche Umfeld.

Lebenslauf

Name: Ralf Schmid
 Geburtsdatum: 6. August 1975
 Geburtsort: Tettngang/Bodenseekreis
 Familienstand: verheiratet mit Brigitte Schmid, geb. Geier, ein Kind (Laurin, geb. 2008)

1982–1986 Grundschole Neukirch
 1986–1995 Rupert-Neß-Gymnasium Wangen/Allgäu
 1995–1996 Zivildienst beim Naturschutzbund Deutschland
 1996–2001 Studium des Vermessungswesens an der Technischen Universität München; studentische Hilfskraft am Geodätischen Institut sowie am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung; Teilnahme an zwei einmonatigen Meßkampagnen in Syrien; Diplomarbeit zum Thema „Entwicklung eines Verfahrens zur halbautomatischen Erfassung von Straßen aus Luft- und Satellitenbildern“
 2001–2007 Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München mit Lehraufgaben im Fachbereich Satellitengeodäsie
 2008– Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie sowie an der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der Technischen Universität München

Hilfreiche Links

VLBI

<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/> *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*
<http://vlbi.geod.uni-bonn.de/IVS-AC/> IVS-Analysekoordinator
<http://www.evlbi.org/> EVN – *European VLBI Network*
<http://www.evga.org/> EVGA – *European VLBI Group for Geodesy and Astrometry*
<http://gemini.gsfc.nasa.gov/solve/> CALC/SOLVE
<http://mars.hg.tuwien.ac.at/~vlbi/> OCCAM
<http://lupus.gsfc.nasa.gov/global/ngs-doc.html> *NGS Card Format*
<ftp://ivs.bkg.bund.de/pub/vlbi/ivsdata/ngs/> Globales IVS-Datenzentrum am BKG
<http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/> *ICRS Product Center*
<http://lupus.gsfc.nasa.gov/> *GSFC VLBI Group*
<http://www.mpifr.de/div/vlbicor/>
 VLBI Korrelator-Gruppe des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn

GNSS-Antennen

<http://igs.org/> *International GNSS Service*
<http://igs.org/projects/antenna/> *IGS Antenna Working Group*
<ftp://igs.org/igscb/station/general/>
 Offizielle IGS-Antennendateien (*antenna.gra, antex13.txt, igs05.atx, rcvr_ant.tab*)
<http://acc.igs.org/> IGS-Analysekoordinator
<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/> Relative Feldkalibrierungen des NGS
<http://gnpcvdb.geopp.de/> Absolute Roboterkalibrierungen der Geo++ GmbH
http://facility.unavco.org/science_tech/dev_test/dev_test.html
 UNAVCO-Untersuchungen von GNSS-Antennen und -Empfängern
<http://www.sapos.de/4aws.htm> 4. GPS-Antennenworkshop in Hannover (21.05.02)
<http://www.sapos.de/5aws.htm> 5. GPS-Antennenworkshop in Frankfurt/Main (03.11.03)
<http://gib.geod.uni-bonn.de/deutsch/mitarbeiter/goerres/2006AWS/Inhalt.pdf>
 6. GPS-Antennenworkshop in Bonn (21.09.06)
<http://tu-dresden.de/geo/gi/aws09> 7. GNSS-Antennenworkshop in Dresden (19./20.03.09)
<http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/>
 *U.S. Coast Guard Navigation Center* (offizielle Dokumente zum GPS-System)
<http://gge.unb.ca/Resources/GPSConstellationStatus.txt> GPS-Satellitenkonstellation
<http://gge.unb.ca/Resources/GLONASSConstellationStatus.txt> GLONASS-Satellitenkonstellation
<http://www.aiub-download.unibe.ch/BSWUSER50/GEN/SATELLIT.I05>
 *Bernese-Datei* mit satellitenspezifischen Informationen
<http://www.epncb.oma.be/> *EUREF Permanent Network*
<ftp://epncb.oma.be/epncb/station/general/calibration.txt> .. Aktuell genutzte Antennentypen im EPN