

Manuela Seitz

**Kombination geodätischer Raumbeobachtungsverfahren
zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems**

München 2009

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



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 630

Kombination geodätischer Raubeobachtungsverfahren zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems

Von der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
der Technischen Universität Dresden
vorgelegte Dissertation zur Erlangung
des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Manuela Seitz

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>

Erklärung des Promovenden:

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema
Kombination geodätischer Raumberechnungsverfahren zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems
wird hiermit bestätigt.

Dresden, am 13.07.2009

Manuela Seitz

Referent: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Dietrich
Korreferenten: Hon.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Drewes
Prof. Dr.-Ing. Lambert Wanninger

Tag der mündlichen Prüfung: 04.12.2008

© 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

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5042-6

Kurzfassung

Globale terrestrische Referenzsysteme und deren Realisierungen, die sogenannten Referenzrahmen, sind die Grundlage für die Beschreibung der Figur der Erde und ihrer Orientierung im Weltraum sowie für die Referenzierung von Vorgängen auf der Erdoberfläche und im nahen Umfeld der Erde. Die Realisierung des Internationalen Terrestrischen Referenzsystems ist eine der zentralen Aufgaben der Geodäsie. Sie erfolgt durch Kombination von Beobachtungsdaten geodätischer Raumb Beobachtungsverfahren. Besondere Bedeutung kommen dabei dem Verfahren der Interferometrie auf sehr langen Basislinien, der Laserentfernungsmessung zu Satelliten sowie dem Globalen Positionierungssystem zu. Jedes dieser Verfahren weist besondere Stärken bei der Bestimmung geodätischer Parameter auf und trägt wesentlich zur Realisierung des Referenzsystems bei. In dieser Arbeit werden Methoden zur Berechnung einer zeitabhängigen und einer zeitunabhängigen Realisierung aus den Beobachtungen der genannten Verfahren entwickelt. Beide Ansätze basieren auf der Kombination bedingungsfreier Normalgleichungen, die aus der homogenen Auswertung der Beobachtungen resultierenden. Diese Vorgehensweise kann als gute Approximation der direkten Kombination der Beobachtungen angesehen werden, die bisher nicht erfolgreich umgesetzt werden konnte. Vom Internationalen Erdrotations- und Referenzsystemdienst (IERS) werden Referenzrahmen basierend auf zeitlich hochaufgelösten Eingangsdaten berechnet. Für die jüngste Lösung des IERS, den ITRF2005, wurden Stationskoordinaten und Erdrotationsparameter (Polkoordinaten und UT1-UTC) erstmalig konsistent ausgeglichen. Entsprechend diesem IERS-Standard werden auch in dieser Arbeit Eingangsdaten mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag beziehungsweise einer Woche verwendet. Zusätzlich zu den genannten Parametern werden Nutations- und bei der zeitunabhängigen Realisierung Troposphärenparameter berücksichtigt. Die zeitabhängige und die zeitunabhängige Realisierung unterscheiden sich hinsichtlich des Zeitraums, aus welchem Beobachtungen berücksichtigt werden und damit hinsichtlich ihrer Parametrisierung, ihres Informationsgehalts, ihres Gültigkeitsbereichs und ihrer Genauigkeit. Es werden spezifische Kombinationsmodelle entwickelt, die diese Eigenschaften berücksichtigen.

Da sich Beobachtungen verschiedener Raumb Beobachtungsverfahren in aller Regel nicht auf gemeinsame Referenzpunkte beziehen, müssen zur Kombination der Stationsnetze Differenzvektoren zwischen dicht beieinander liegenden Referenzpunkten verschiedener Verfahren eingeführt werden. Die gemessenen Differenzvektoren weisen teilweise große Diskrepanzen zu den Koordinatendifferenzen auf, die aus den Raumb Beobachtungsverfahren bestimmt werden. Deshalb müssen geeignete gemessene Differenzvektoren für die Kombination ausgewählt werden. Zwei Kriterien werden für die Auswahl formuliert: Die Konsistenz der kombinierten Lösung soll maximal sein, und die Geometrie der verfahrensspezifischen Stationsnetze soll in der Kombination erhalten bleiben. Zur Quantifizierung der Konsistenz werden die Polkoordinaten herangezogen. Es wird gezeigt, dass diese sich in ihrer Eigenschaft als globale Parameter, die aus allen genannten Beobachtungsverfahren geschätzt werden können, hervorragend zur Beurteilung der Konsistenz eignen. Für beide Realisierungen wird nachgewiesen, dass die Kombination der verschiedenen Beobachtungsverfahren für die Mehrzahl der Parameter zu einer Genauigkeitssteigerung im Vergleich zu den verfahrensspezifischen Lösungen führt. Für einige der Parameter wird eine Verbesserung von 10% und mehr erreicht. Es wird eine Methode zur Kombination von Troposphärenparametern entwickelt und für die Realisierung des zeitunabhängigen Referenzrahmens getestet. Die Kombination der Troposphärenparameter führt zu einer weiteren Verbesserung der Genauigkeit der kombinierten Lösung. Eine Gegenüberstellung des zeitabhängigen und des zeitunabhängigen Referenzrahmens zeigen die unterschiedlichen Potentiale beider Lösungen. Anhand der Ergebnisse der Arbeit werden Empfehlungen zur Verbesserung öffentlich bereitgestellter Kombinationsprodukte formuliert. Hervorzuheben ist dabei, dass die Kombination der Beobachtungsverfahren auf der Ebene der Normalgleichungen oder - wenn möglich - auf Ebene der Beobachtungsgleichungen durchgeführt werden sollte, und dass die speziellen Eigenschaften der Parameter im Kombinationsprozess besser genutzt werden sollten.

Abstract

Global terrestrial reference systems and their realizations, the so called reference frames, are fundamental for the description of the Earth's shape and its orientation in space and for referencing changes on the Earth's surface and its planetary environment. The Realization of the International Terrestrial Reference System is one of the main tasks of geodesy. It is achieved by the combination of observation data of different space geodetic techniques. The most important techniques are the Very Long Baseline Interferometry, Satellite Laser Ranging and the Global Positioning System. Each of these techniques has individual strengths with respect to the estimation of geodetic parameters and contributes significantly to the realization of the terrestrial reference system. In this thesis methods are developed, which allow for the realization of a time-dependent as well as for a time-independent reference frame from space observation data. Both methods are based on the combination of free normal equations which result from the homogeneous analysis of the different observation types. This approach

is a good approximation for the direct combination of observations, which has not yet been implemented successfully. The International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) computes reference frames from input data with high temporal resolution. For the most recent solution, the ITRF2005, station coordinates and Earth rotation parameters (pole coordinates and UT1-UTC) were estimated consistently for the first time. In analogy to the IERS standards, input data with daily and weekly resolution are used in this work. In addition to the above mentioned parameters, nutation and troposphere parameters are considered. The time-dependent and the time-independent reference frame are based on observation data of different time spans (two years and one day respectively). Consequently, they are characterised by a different parameterisation and show discrepancies with respect to information content, validity, and accuracy. This requires the development of individual combination models for both realizations.

Usually, observations of different space geodetic techniques do not refer to a common reference point. Neighbouring reference points of different techniques are combined by introducing terrestrial difference vectors. In some cases the comparison of the terrestrial difference vectors and the coordinate differences computed from the solutions of the space geodetic techniques show large discrepancies. Thus, the selection of difference vectors which are suitable for the combination is essential. Two criteria for the selection are formulated: The consistency of the combined solution shall be maximal and the geometry of the technique specific station networks shall not be changed by the combination. The consistency is quantified on the basis of the pole coordinates. It is demonstrated, that the pole coordinates are qualified to describe the consistency, since they are global parameters that can be estimated from the observations of all techniques. For both realizations it is shown, that the combination leads to an improvement of accuracy for most of the parameters compared to the technique specific solutions. For some parameters an improvement of 10% or more is achieved. Additionally, a method for the combination of troposphere parameters is developed and tested for the computation of the time-independent reference frame. The computation of the troposphere parameters leads to a further increase of the accuracy of the combined solution. The comparison of the time-dependent and the time-independent reference frame discloses the individual potentials of both frames. Based on the results, recommendations for the improvement of official combination products are formulated. The most important suggestions are, that the combination of space geodetic techniques shall be performed on the level of normal equations, or if possible on the level of observations. Furthermore, the individual characteristics of the parameters should be used more effectively in the combination process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Einordnung der Arbeit in die aktuellen Aktivitäten auf nationaler und internationaler Ebene . . .	7
1.3	Zielsetzung der Arbeit	8
2	Referenzsysteme	10
2.1	Terrestrisches Referenzsystem ITRS und seine Realisierung ITRF	10
2.2	Zälestisches Referenzsystem ICRS und seine Realisierung ICRF	12
2.3	Transformation zwischen zälestischem und terrestrischem System	13
2.4	Zeitliche Veränderung und Deformation des Referenzrahmens	15
2.4.1	Tektonische Bewegungen	16
2.4.2	Gezeitendeformation des Erdkörpers	16
2.4.3	Rotationsdeformation infolge der Polbewegung (Polgezeiten)	17
2.4.4	Auflastdeformation	17
2.4.5	Weitere Effekte	21
3	Raumbeobachtungsverfahren	22
3.1	Interferometrie auf sehr langen Basislinien - VLBI	22
3.1.1	Beobachtungsgleichung des VLBI-Verfahrens	22
3.1.2	Fehlereinflüsse auf VLBI-Beobachtungen	23
3.2	Globales Positionierungssystem - GPS	30
3.2.1	Beobachtungsgleichung des GPS-Verfahrens	30
3.2.2	Fehlereinflüsse auf GPS-Beobachtungen	31
3.3	Laserentfernungsmessung zu Satelliten - SLR	34
3.3.1	Beobachtungsgleichung des SLR-Verfahrens	34
3.3.2	Fehlereinflüsse auf SLR-Beobachtungen	35
4	Kombination geodätischer Raumbeobachtungsverfahren	37
4.1	Kombinationsverfahren	37
4.2	Mathematische Grundlagen der Kombination von Normalgleichungen	39
4.2.1	Grundlagen der Ausgleichsrechnung	39
4.2.2	Addition von Normalgleichungssystemen	40
4.2.3	Anpassung der Näherungswerte zweier Normalgleichungssysteme	41
4.2.4	Transformation des Parametervektors	41
4.2.5	Schätzung von Parametern einer Ähnlichkeitstransformation	43
4.2.6	Einführung zusätzlicher Parameter	45
4.2.7	Reduktion von Variablen	46
4.2.8	Ausgleichung unter Verwendung von Pseudobeobachtungen	46

4.2.9	Rekonstruktion freier Normalgleichungen	48
4.3	Kombinationsmodelle für die Realisierung terrestrischer Referenzsysteme	49
4.3.1	Kombinationsmodell für eine zeitabhängige Realisierung	50
4.3.2	Kombinationsmodell für eine zeitunabhängige Realisierung	56
4.3.3	Umsetzung der Kombinationsmodelle	57
5	Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems am Beispiel homogen prozessierter Beobachtungen	58
5.1	Beobachtungsdaten	58
5.1.1	GPS-, VLBI- und SLR-Beobachtungsdaten	58
5.1.2	Terrestrisch bestimmte Differenzvektoren	61
5.2	Realisierung eines zeitabhängigen Referenzsystems	66
5.2.1	Kombination eines zeitabhängigen Referenzrahmens je Beobachtungsverfahren	66
5.2.2	Vergleich und Kombination der Raumbeobachtungsverfahren	71
5.2.3	Validierung des zeitabhängigen Referenzrahmens	79
5.3	Realisierung eines zeitunabhängigen Referenzrahmens (Epochen-Referenzrahmen)	93
5.3.1	Vergleich und Kombination der Raumbeobachtungsverfahren	93
5.3.2	Validierung des zeitunabhängigen Referenzrahmens	100
5.4	Vergleich und Kombination von Troposphärenparametern	105
5.4.1	Vergleich von Troposphärenparametern	105
5.4.2	Kombination der Troposphärenparameter	111
5.4.3	Validierung terrestrischer Differenzvektoren mit Hilfe von Troposphärenparametern	112
5.4.4	Validierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung durch Beobachtungen von Wasserdampfradiometern	115
5.5	Vergleich des zeitabhängigen und des zeitunabhängigen Referenzrahmens	117
6	Zusammenfassung und Empfehlungen für zukünftige Arbeiten	121
	Literatur	126
	Abbildungsverzeichnis	137
	Tabellenverzeichnis	139
	Anhang	143

1. Einführung

1.1 Motivation

Globale terrestrische Referenzsysteme und deren Realisierungen, die als Referenzrahmen bezeichnet werden, bilden die Grundlage für die Beschreibung der Gestalt der Erde sowie von Vorgängen auf der Erdoberfläche, im erdnahen Raum und im Erdinneren. Sie sind damit wesentlich für viele Bereiche, wie beispielsweise die Realisierung nationaler und regionaler Referenzsysteme, präzise Navigation, für die Referenzierung von Geoinformationsdaten und für wissenschaftliche Untersuchungen des Systems Erde. Dazu gehören unter anderem die Bestimmung der tektonischen Bewegung der Platten der Lithosphäre, der Variationen des Meeresspiegels, periodischer, episodischer und säkularer Bewegungen der Erdoberfläche, des Erdschwerefeldes und seiner zeitlichen Variation und nicht zuletzt der Orientierung der Erde im Weltraum.

Die zur Quantifizierung der genannten Vorgänge aus Raumb Beobachtungsverfahren abgeleiteten geodätischen Parameter haben in den letzten Jahren und Jahrzehnten eine starke Genauigkeitssteigerung erfahren, die zum einen auf technische Entwicklungen, zum anderen aber auch auf verbesserte Auswertemethoden zurückzuführen ist. Die wichtigste Grundlage für die aus den Beobachtungen abgeleiteten geodätischen Parameter ist ein hochgenauer Referenzrahmen. Durch die Steigerung der Genauigkeit der Beobachtungsverfahren haben auch die Anforderungen an die Genauigkeit und die Konsistenz des zugrundeliegenden Referenzrahmens stark zugenommen.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Berechnung solcher hochgenauer konsistenter Referenzrahmen, die auf der Kombination homogener prozessierter Beobachtungsdaten basiert. Schwerpunkte dabei sind die Entwicklung einer Kombinationsstrategie (im Folgenden auch Kombinationsmodell genannt) sowie deren numerische Umsetzung unter Verwendung der Beobachtungen geometrischer Raumb Beobachtungsverfahren. Ferner wird untersucht, inwieweit die Kombination bisher bei der Berechnung eines Referenzrahmens nicht berücksichtigter Parameter zu dessen Stabilisierung beiträgt.

1.2 Einordnung der Arbeit in die aktuellen Aktivitäten auf nationaler und internationaler Ebene

Die Berechnung globaler terrestrischer Referenzrahmen basiert auf der Kombination von Beobachtungen der geodätischen Messverfahren VLBI (Interferometrie auf sehr langen Basislinien, engl.: *Very Long Baseline Interferometry*), SLR (Laser-Entfernungsmessung zu Satelliten, engl.: *Satellite Laser Ranging*), GPS (Globales Positionierungssystem, engl.: *Global Positioning System*) und DORIS (engl.: *Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite*). Der neueste globale Referenzrahmen ist der Internationale Terrestrische Referenzrahmen ITRF2005 (ALTAMIMI *et al.* 2007), der vom Internationalen Erdrotations- und Referenzsystemdienst (IERS) zur Verfügung gestellt wird. Die Eingangsdaten werden von den internationalen Diensten der verschiedenen Beobachtungsverfahren bereitgestellt. Die Berechnung des ITRF2005 erfolgte an den ITRS Kombinationszentren (engl.: ITRF Combination Centres) des IERS: dem Institut Géographique National (IGN, Paris), dem Institut Natural Resources Canada (NRCan) und dem Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI, München). Bisher wurden für die Berechnung des ITRF Eingangsdaten verwendet, die nicht konsistent prozessiert waren, sondern die sich teilweise bezüglich der verwendeten Modelle und Parametrisierungen unterschieden. Dadurch wurde die Genauigkeit und die Konsistenz des Referenzrahmens eingeschränkt. Während in die Berechnung vorangegangener ITRF (ITRF2000, ITRF97 und frühere) eine zeitabhängige Lösung (mit Stationspositionen und -geschwindigkeiten) je Beobachtungsverfahren Eingang fand, zu deren Berechnung alle Beobachtungen dieses Verfahrens verwendet wurden, basiert der ITRF2005 erstmalig auf der Kombination von zeitlich hochaufgelösten Eingangsdaten. Dieser neue Ansatz ermöglicht die Überwachung nicht-linearer Stationsbewegungen und die Aufdeckung von Diskontinuitäten in den Bewegungen aller Stationen während des Kombinationsprozesses sowie die einheitliche Berücksichtigung solcher Effekte für die Stationen aller Beobachtungsverfahren. Eine weitere Neuerung bezüglich vorangegangener ITRF ist die gemeinsame konsistente Berechnung von ITRF und korrespondierenden Erdorientierungsparametern (EOP) in einer Ausgleichung. Wie auch für die Berechnung des ITRF2005 werden in der vorliegenden Arbeit zeitlich hochaufgelöste Eingangsdaten der Messverfahren VLBI, SLR und GPS verwendet. Im Gegensatz zum ITRF2005 wurden jedoch die zur Auswertung der verschiedenen Beobachtungsverfahren verwendeten Softwares bezüglich der verwendeten Modelle und Parametrisierungen homogenisiert, so dass konsistente Eingangsdaten vorlagen. Im Vergleich zum

ITRF2005 werden außerdem neben den Stationskoordinaten und EOP zusätzlich die Troposphärenparameter als gemeinsame Parameter berücksichtigt.

Die eingangs genannten Raumbeobachtungsverfahren sind neben anderen (zum Beispiel: Schwerefeldmissionen CHAMP, GRACE und GOCE, Satellitenaltimetrie, *Synthetic Aperture Radar* (SAR), GLONASS und zukünftig GALILEO) wesentlicher Bestandteil des globalen geodätischen Beobachtungssystems GGOS (engl: *Global Geodetic Observing System*) der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG), das der Überwachung des Erdsystems mit seinen Komponenten feste Erde, Ozeane, Atmosphäre und anderen Subsystemen dient. In GGOS werden die drei fundamentalen Forschungsgebiete der Geodäsie zusammengefasst: die Geometrie der Erde mit Land, Eis und Ozeanen, die Orientierung der Erde im Raum und das Schwerefeld der Erde sowie die zeitliche Veränderung dieser Größen (RUMMEL *et al.* 2005). Ziel von GGOS ist es, konsistente und zuverlässige geodätische Parameter zur Beschreibung der Gestalt, des Schwerefeldes und der Rotation der Erde bereitzustellen. Um die Konsistenz der erhaltenen Parameter zu gewährleisten, werden einheitliche Auswertestandards für alle Beobachtungsverfahren festgelegt. Jedes der Beobachtungsverfahren weist Stärken und Schwächen bei der Bestimmung einzelner geodätischer Parameter auf. Die Kombination der Beobachtungsverfahren ermöglicht die optimale Nutzung der Stärken und den Ausgleich der Schwächen und führt damit zu einer Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der resultierenden Parameter. Der Gedanke, gemeinsame geodätische Parameter verschiedener Verfahren zu kombinieren, ist nicht neu und wird von verschiedenen Gruppen schon über mehrere Jahre hinweg verfolgt, so zum Beispiel durch den IERS bei der Kombination der EOP und der Stationskoordinaten zur Berechnung des ITRF. Die Kombination aller gemeinsamen Parameter und damit die konsistente Berechnung aller geodätischen Produkte wird jedoch erstmalig in GGOS möglich. Die Kombination der Beobachtungsverfahren zu einem hochgenauen Referenzrahmen ist somit ein wesentlicher Beitrag zu GGOS und dient gleichzeitig der Referenzierung der aus GGOS erhaltenen Zeitreihen geodätischer Parameter (RUMMEL *et al.* 2002). GGOS trägt sowohl durch den Referenzrahmen als auch durch die Zeitreihen geodätischer Parameter entscheidend zum globalen Erdbeobachtungssystem (Global Earth Observing System of Systems, GEOSS) bei und liefert wichtige Beiträge zur Erforschung des globalen Wandels, insbesondere der Erforschung des hydrologischen Wasserkreislaufs, der Atmosphären- und Ozeandynamik sowie von Veränderungen der Erdkruste. Ein hochgenauer Referenzrahmen ist damit nicht nur für die Geodäsie von großer Bedeutung sondern für die Erdsystemforschung im Allgemeinen.

Innerhalb eines gemeinsamen Forschungsvorhabens der vier deutschen Institutionen Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn, Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum und Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut sollen geometrische und gravimetrische Daten konsistent ausgewertet und wichtige geodätische Parameter (zum Beispiel Stationsbewegungen, Schwerefeldänderungen, Meeresspiegelvariationen) verglichen und kombiniert werden. Der Name des Projekts, GGOS-D, steht dabei für einen deutschen Beitrag zu GGOS. In Vorbereitung dieses Projekts wurden bereits Beobachtungsdaten der geometrischen Raumbeobachtungsverfahren VLBI, SLR und GPS homogen ausgewertet (zum Beispiel THALLER *et al.* 2006). Diese Daten eignen sich hervorragend zur Berechnung eines Referenzrahmens und wurden für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Das Potential der konsistent ausgewerteten Beobachtungen liegt insbesondere darin, dass Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Konsistenz der Produkte gesteigert werden können. Zudem lassen sich bisher nicht erkannte systematische Unterschiede zwischen den Beobachtungsverfahren aufgedeckt.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems aus den genannten homogen prozessierten Daten. Dabei wird sowohl die zeitabhängige wie auch die zeitunabhängige Realisierung betrachtet. Diese unterscheiden sich durch die Länge des Zeitintervalls, aus welchem Beobachtungen in die Berechnung eingehen und damit durch ihren Gültigkeitsbereich. Für die Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens werden Beobachtungen eines Zeitintervalls von mehreren Jahren verwendet. Die Zeitabhängigkeit der Stationspositionen wird durch das Schätzen geeigneter Parameter berücksichtigt. Der zeitunabhängige Referenzrahmen (Epochenreferenzrahmen) basiert auf Beobachtungen eines relativ kurzen Zeitraums, beispielsweise eines Tages. Die Stationspositionen werden für diesen Zeitraum als konstant angenommen. Die beiden Referenzrahmen unterscheiden sich durch ihren Informationsgehalt und ihre Genauigkeit. Während bei dem zeitabhängigen Referenzrahmen eine hohe rechnerische Genauigkeit im Vordergrund steht, aber nur die mittleren Stationspositionen und -bewegungen für einen längeren Zeitraum angegeben werden, spiegelt der Epochenreferenzrahmen die tatsächliche Geometrie des Stationskoordinatennetzes zur entsprechenden Epoche wider. Jedoch reicht seine Genauigkeit nicht an die des zeitabhängigen Referenzrahmens heran.

In dieser Arbeit werden Kombinationsmodelle zur Berechnung der beiden Referenzrahmen entwickelt, wobei die jeweiligen Besonderheiten herausgearbeitet und bestmöglich berücksichtigt werden. Die Forderung einer höchstmöglichen Genauigkeit, Stabilität und Konsistenz der Referenzrahmen ist ausschlaggebend für die Wahl der Methoden.

Die Umsetzung der entwickelten Strategien erfolgt am Beispiel homogen prozessierter Beobachtungsdaten. Dabei wird die Bedeutung der Homogenisierung der verschiedenen zur Auswertung der Beobachtungen verwendeten Softwarepakete herausgestellt. Die Grundlage dafür bildet die Beschreibung der einzelnen Beobachtungsverfahren, der Fehlereinflüsse auf die Beobachtungen sowie deren Berücksichtigung in der Auswertung in den Kapiteln 2 und 3 der Arbeit.

Weiterhin erfolgt ein eingehender Vergleich der gemeinsamen Parameter der betrachteten Raumb Beobachtungsverfahren sowie die Analyse und Interpretation auftretender Diskrepanzen. Dies umfasst auch die Untersuchung der Diskrepanzen zwischen den Raumb beobachtungsverfahren und terrestrisch gemessenen Differenzvektoren zwischen den Referenzpunkten direkt benachbarter Beobachtungsstationen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Untersuchung der Beobachtungsverfahren im Hinblick auf ihre Eignung zur Festlegung des geodätischen Datums.

Der Vergleich des zeitabhängigen und zeitunabhängigen Referenzrahmens sowie die Validierung der einzelnen Ergebnisse sind zentraler Gegenstand der Arbeit. Eine wichtige Aufgabe dabei ist die Ableitung realistischer Genauigkeiten für die Kombinationsergebnisse. Darüber hinaus wird untersucht, inwieweit eine zusätzliche Kombination der Troposphärenparameter zu einer weiteren Verbesserung des Referenzrahmens führt.

Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden stellen einen wesentlichen Beitrag zu den aktuellen wissenschaftlichen Aktivitäten auf dem Gebiet der Kombination und speziell zu den Arbeiten des IERS dar. Eine Intention der Arbeit ist es daher, Vorschläge zur Verbesserung der Produkte des IERS herauszuarbeiten.

2. Referenzsysteme

Die Erde ist wie andere Himmelskörper nicht statisch sondern unterliegt Bewegungen, Rotationen und Deformationen. Eine der wichtigsten Aufgaben der Geodäsie, Astronomie und Geophysik ist die Beschreibung dieser kinematischen und dynamischen Vorgänge. Die Position von Körpern und deren Bewegung sind jedoch keine absoluten Größen, sondern sie können nur in Bezug auf eine Referenz beschrieben werden. Eine solche Referenz kann beispielsweise ein kartesisches Koordinatensystem sein. Für die Beschreibung der Bewegungen der Erde ist wegen der räumlichen Problemstellung ein dreidimensionales Koordinatensystem sinnvoll. Es kann durch die Festlegung eines Koordinatenursprungs, dreier orthogonaler Basisvektoren und einer Längeneinheit vollständig beschrieben werden. Ein solches rein theoretisch definiertes Koordinatensystem wird auch als *ideelles terrestrisches Bezugssystem* (engl.: *ideal terrestrial system*) bezeichnet. Der Zugriff auf das Referenzsystem kann nur über konkrete Punkte erfolgen, deren Koordinaten im System bekannt sind. Um den Zusammenhang zwischen den Koordinaten dieser Punkte und dem Referenzsystem eindeutig beschreiben zu können, ist es notwendig, physikalische Modelle sowie deren Modellparameter explizit festzulegen (zum Beispiel die Beschreibung der Erdzeiten, Lovezahlen) (KOVALEVSKY *et al.* 1989). Es wird dann von einem *konventionellen Referenzsystem* gesprochen. Dieses besteht folglich nicht nur aus der Definition des kartesischen Koordinatensystems, sondern gibt gleichzeitig den theoretischen Bezug zwischen Koordinatensystem und Koordinaten an. Für die Referenzierung von Stationen oder Prozessen, wie sie in den Geowissenschaften oder der Astronomie Anwendung findet, ist eine Materialisierung (Realisierung) dieses rein mathematisch-physikalisch beschriebenen Systems erforderlich. Dadurch wird mit Hilfe von Messungen ein direkter Zugang zum Bezugssystem möglich. Die Realisierung eines konventionellen Referenzsystems wird als *konventioneller Referenz- oder Bezugsrahmen* bezeichnet. Er besteht aus festen Punkten auf der Erdoberfläche, optischen Sternen oder Radioquellen, deren Koordinaten unter Berücksichtigung der Festlegungen (Konventionen) des entsprechenden Referenzsystems berechnet werden.

In der Geodäsie und Astronomie sind zwei Arten konventioneller kartesischer Referenzsysteme gebräuchlich: Raumfeste Systeme, in denen die Beschreibung der Vorgänge im Weltraum erfolgt, und erdfeste Systeme, welche zur Referenzierung von Vorgängen auf der Erdoberfläche dienen. Während es sich bei raumfesten Systemen um Inertialsysteme handelt, also Systeme, die keinen Beschleunigungen unterliegen, sind erdfeste Systeme rotierende und damit beschleunigte Bezugssysteme. In diesen müssen Scheinkräfte, wie beispielsweise die Corioliskraft, berücksichtigt werden. Deshalb eignet sich ein solches System insbesondere zur Darstellung von Positionen und langsamen Bewegungsabläufen von Objekten, die in direkter Verbindung mit der Erdoberfläche stehen und der Erdrotation unterliegen.

Der Internationale Erdrotations- und Referenzsystemdienst (IERS) hat die Aufgabe übernommen, ein erdfestes und ein raumfestes Bezugssystem, nämlich das Internationale Terrestrische Referenzsystem (engl.: *International Terrestrial Reference System*, ITRS) und seine Realisierung (engl.: *International Terrestrial Reference Frame*, ITRF) sowie das Internationale Zälestische Referenzsystem (engl.: *International Celestial Reference System*, ICRS) und dessen Realisierung (engl.: *International Celestial Reference Frame*, ICRF) zur Verfügung zu stellen. Beide Bezugssysteme und ihre Realisierungen werden im Folgenden beschrieben.

Neben den genannten kartesischen Koordinatensystemen sind in der Geodäsie weitere Referenzsysteme gebräuchlich. So dient das Geoid als Höhenbezugsfläche, Rotationsellipsoide werden zur Referenzierung von geographischen Lagekomponenten und das Normalschwerefeld eines Ellipsoids als Referenzfläche für das Schwerefeld verwendet (TORGE 2002).

2.1 Terrestrisches Referenzsystem ITRS und seine Realisierung ITRF

Zur Beschreibung von Positionen und Bewegungsabläufen auf der Erdoberfläche eignet sich ein erdfestes (terrestrisches) Koordinatensystem, das den Bewegungen der Erde unterliegt. Um ein solches System festzulegen, müssen die Bewegungen der Erde und ihre Deformationen möglichst genau beschrieben werden (siehe Kapitel 2.4). Durch Konventionen, die die Modellierung der Bewegungen von Punkten auf der Erdoberfläche festlegen, wird das System an den sich bewegenden und deformierenden Erdkörper angepasst. Das Internationale Terrestrische Referenzsystem stellt ein solches System dar. Es ist ein rechtshändiges Koordinatensystem, dessen Basisvektoren gleich skaliert sind. Konkrete Empfehlungen für die Definition des ITRS wurden 1991 in Wien in der Resolution Nr.2 der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) gegeben (GEODESIST'S HANDBOOK 1992). Der IERS ist mit der Definition, der Realisierung und der Veröffentlichung des ITRS betraut. In Anlehnung an die Empfehlungen der IAU wurden vom IERS die folgenden Festlegungen für den ITRS getroffen (MCCARTHY und PETIT 2004):

- Der Koordinatenursprung liegt im Massenzentrum der Erde, wobei Ozeane und Atmosphäre mit berücksichtigt sind.
- Die Längeneinheit ist das Meter (SI). Der Maßstab ist konsistent mit der Koordinatenzeit im Geozentrum (franz.: *Temps-coordonnée géocentrique* (TCG)).
- Die Orientierung ist konsistent mit der des BIH Terrestrial System (BTS) zur Epoche 1984.0 (BIH: Bureau International de l'Heure). (Anmerkung: Der IERS Referenzpol (IRP) und der Referenzmeridian (IRM) sind konsistent mit der Orientierung des BTS im Bereich von ± 5 mas (MCCARTHY 1996). Der BIH Referenzpol wurde im Jahr 1967 an den international vereinbarten Pol CIO (engl: *Conventional International Origin*) angepasst. Der CIO wurde als das Mittel der zwischen 1900.0 und 1906.0 bestimmten Lage der Rotationsachse der Erde festgelegt.)
- Die zeitliche Entwicklung der Orientierung wird definiert, indem gefordert wird, dass die horizontalen Geschwindigkeiten aller Stationen keine gemeinsame Rotation aufweisen. In einem solchen System trägt die Deformation der Erde nicht zu ihrem Drehimpuls bei (Tisserand-System) (MUNK und McDONALD 1960, KINOSHITA und SASAO 1989).

Für die Angabe ellipsoidischer Koordinaten wird als Referenzellipsoid das GRS80-Ellipsoid empfohlen (MORITZ 1980, MORITZ 2000).

Die Realisierung des ITRS erfolgt durch den Internationalen Terrestrischen Referenzrahmen, der einen Satz von Positionen und Geschwindigkeiten von Punkten auf der Erdoberfläche umfasst. Realisierungen des ITRS werden vom IERS seit 1988 in Abständen von einem bis zu fünf Jahren veröffentlicht. Die Berechnung des ITRF erfolgt durch die Kombination von Stationskoordinaten (Positionen und Geschwindigkeiten), die aus den Beobachtungen der geodätischen Raumbeobachtungsverfahren VLBI, SLR (in einigen Lösungen auch Laserentfernungsmessungen zum Mond (engl: *Lunar Laser Ranging* (LLR))), GPS und DORIS abgeleitet werden. Die Beobachtungen der verschiedenen Verfahren beziehen sich in der Regel nicht auf gemeinsame Referenzpunkte. Für die Kombination werden daher terrestrisch oder mit Hilfe von GPS gemessene Differenzvektoren (engl.: *local ties*) zwischen benachbarten Instrumenten verschiedener Verfahren benötigt.

Der aktuelle ITRF ist der ITRF2005 (ALTAMIMI *et al.* 2007). Für seine Berechnung wurden grundlegende Änderungen an der bisherigen Kombinationsstrategie vorgenommen. Während die vorherigen Lösungen auf der Kombination von Mehrjahreslösungen (zeitabhängige Lösungen mit Stationspositionen und -geschwindigkeiten) der einzelnen Raumbeobachtungsverfahren beruhten, waren die Eingangsdaten des ITRF2005 Tages- beziehungsweise Wochenlösungen, was eine für alle Beobachtungsverfahren einheitliche Analyse und Modellierung der Stationsbewegungen ermöglichte. Zudem wurden erstmalig die Erdrotationsparameter (ERP) der verschiedenen Raumbeobachtungsverfahren (Polkoordinaten und deren zeitliche Ableitungen sowie die Änderung der Tageslänge) kombiniert und gemeinsam mit den Stationskoordinaten ausgeglichen, wodurch Konsistenz zwischen dem ITRF und den ERP erreicht, und damit eine zentrale Aufgabe des IERS erfüllt ist (ALTAMIMI *et al.* 2007). Durch die hohe zeitliche Auflösung der Eingangsdaten war es außerdem möglich, die Stabilität des Stationskoordinatennetzes und die gemeinsame Bewegung der Stationen relativ zum Massenzentrum der Erde zu untersuchen (ALTAMIMI *et al.* 2007).

Die Positionen und Geschwindigkeiten der Stationen des ITRF werden in Bezug zum Koordinatenursprung des ITRS bestimmt. Er kann in seiner Eigenschaft als dynamischer Ursprung der Satellitenbahnen nur aus den Beobachtungen der Satellitenverfahren realisiert werden. Massenverlagerungen im Erdsystem führen zu zeitlichen Variationen in der relativen Lage von Massenzentrum und Punkten auf der Erdoberfläche (BARKIN 1999). Neben einer linearen Verschiebung, die durch die Bewegung der Lithosphärenplatten hervorgerufen wird, treten vor allem saisonale Signale auf. Sie werden durch jahreszeitlich variierende Massenverlagerungen in der Atmosphäre, den Ozeanen und der kontinentalen Hydrosphäre verursacht. Eine detaillierte Beschreibung saisonaler Variationen der Erdkruste relativ zum Massenzentrum geben beispielsweise CHEN *et al.* 1999 und DONG *et al.* 1997. Die jahreszeitlichen Bewegungen betragen wenige Millimeter in den Äquatorialkomponenten x und y und etwa 10 mm in Richtung der z -Komponente. Sie werden bei der Auswertung der geodätischen Beobachtungen nicht berücksichtigt. Die Realisierung des Koordinatenursprungs erfolgt heute ausschließlich auf der Grundlage der SLR-Beobachtungen. Aus den SLR-Beobachtungen einer Woche kann der Ursprung mit einer Genauigkeit von 2-3 mm festgelegt werden (PAVLIS 2003). GPS und DORIS sollten sich wegen ihrer sehr guten Bahnkonfiguration ebenfalls gut zur Bestimmung des Massenzentrums eignen. Jedoch sind die Beobachtungen neben kleineren Effekten vor allem durch eine unzureichende Modellierung des solaren Strahlungsdrucks verfälscht (siehe Kapitel 3.2.2), was zu periodischen Signalen in den geschätzten Bahnparametern und damit im Koordinatenursprung führt. Derzeit wird von verschiedenen Gruppen, zum Beispiel am Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB), an der Verbesserung der Strahlungsdruckmodellierung der GPS-Satelliten gearbeitet.

Es ist absehbar, dass es in naher Zukunft möglich sein wird, den Koordinatenursprung mit hoher Genauigkeit aus GPS-Beobachtungen zu realisieren.

Bislang wurden die saisonalen Variationen der relativen Lage von Massenschwerpunkt und Punkten auf der Erdoberfläche bei der Berechnung des ITRF nicht berücksichtigt. Da der Koordinatenursprung durch Stationspositionen und -geschwindigkeiten des ITRF realisiert wird, stellt er einen mittleren Ursprung des Stationsnetzes über den Zeitraum der verwendeten SLR-Beobachtungen dar (ALTAMIMI *et al.* 2002). Zur gewählten Referenzeпоche ist der Koordinatenursprung mit dem mittleren Massenzentrum näherungsweise identisch. Geringfügige Abweichungen ergeben sich, wenn das Mittel der Variationen im betrachteten Zeitraum nicht Null ist. Neben den jahreszeitlichen Variationen treten säkulare Relativbewegungen zwischen Massenzentrum und Erdkruste auf, die ebenfalls durch Massenverlagerungen im Erdsystem hervorgerufen werden (GREFF-LEFFTZ 2000). Durch die gewählte Parametrisierung des ITRF, welche die Geschwindigkeiten der Stationen beinhaltet, werden die zeitlich linearen Anteile dieser Bewegungen als Translation des Stationskoordinatennetzes gegenüber dem Koordinatenursprung beschrieben. Die Berechnung des ITRF2005 basiert auf Lösungen der einzelnen Raumbereobachtungsverfahren, die mit Hilfe von Ähnlichkeitstransformationen kombiniert werden. Diese Vorgehensweise führt zu Abweichungen des Koordinatenursprungs vom mittleren Massenzentrum und zu einer Verfälschung der Stationsgeschwindigkeiten (DREWES 2008). Dieses Problem wird in Kapitel 4.1 noch einmal diskutiert.

Der Maßstab des ITRF wird durch die physikalischen Konstanten c_0 (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum) und GM (Gravitationskonstante multipliziert mit der Masse der Erde) sowie die Modellierung relativistischer Effekte bei der Auswertung der geodätischen Beobachtungen festgelegt. Die Realisierung des ITRF-Maßstabs erfolgt durch eine gewichtete Mittelbildung des Maßstabs der VLBI- und der SLR-Lösung. Eine Ausnahme ist der ITRF2005, dessen Maßstab nur aus den VLBI-Lösungen bestimmt wurde (ALTAMIMI *et al.* 2007). Da die Lösungen dieser Raumbereobachtungsverfahren nicht, wie in den Konventionen des IERS gefordert, bezogen auf die geozentrische Zeit (TCG) sondern auf die Terrestrische Zeit (TT) vorliegen, wurde für den ITRF94 und ITRF97 zusätzlich eine Korrektur von 0.7 ppb angebracht (MCCARTHY und PETIT 2004). Der Maßstab der letzten Realisierungen - des ITRF2000 und des ITRF2005 - bezieht sich dagegen, abweichend von den Konventionen, auf die terrestrische Zeit. GPS- und DORIS-Beobachtungen werden bislang nicht zur Festlegung des Maßstabs verwendet, da stationsspezifische Korrekturen, die mit dem Netzmaßstab in engem Zusammenhang stehen (zum Beispiel Phasenzentrumskorrekturen), teilweise systematisch verfälscht sind. Ebenso wie die Festlegung des Koordinatenursprungs im Massenzentrum wurde bei der Berechnung des ITRF2005 auch die Realisierung des Maßstabs durch die gewählte Kombinationsmethode systematisch verfälscht.

Die Festlegung der Orientierung des ITRF geht bis auf den Referenzrahmen BTS87 zurück (MCCARTHY und PETIT 2004), der an die EOP-Reihen des BIH angeglichen wurde. Für jede nachfolgende Realisierung wurde gefordert, dass sie gegenüber der vorangegangenen keine Orientierungsänderung und keine Rotationen aufweist. Eine Ausnahme ist der ITRF93, der konsistent zu den EOP-Reihen des IERS ausgeglichen wurde.

Die gemeinsame Bewegung aller Stationen des Netzes parallel zu einer Sphäre kann als eine Rotation um eine geozentrisch gelagerte Achse beschrieben werden und steht damit in direktem Zusammenhang zur Erdrotation (DREWES *et al.* 2006). Um eine Rotation des gesamten Netzes auszuschließen, wurde der ITRF92 konsistent zum plattenkinematischen Modell NNR-NUVEL-1A (DEMETS *et al.* 1994) ausgeglichen, bei dessen Berechnung eine gemeinsame Rotation der Lithosphärenplatten reduziert wurde. Für den ITRF94 wurde gefordert, dass er keine Rotationen gegenüber dem ITRF92 erfährt. Alle folgenden Realisierungen wurden so berechnet, dass sie keine Rotationen gegenüber dem jeweils vorhergehenden ITRF aufweisen (MCCARTHY und PETIT 2004).

Historische ITRF-Lösungen unterscheiden sich in ihrer Berechnung teilweise von den aktuellen. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen ITRF-Lösungen gibt ALTAMIMI *et al.* (2002).

Neben den genannten Konventionen sind in MCCARTHY und PETIT (2004) weitere Festlegungen getroffen, die bei der Realisierung des Systems berücksichtigt werden sollen. Dazu gehören Modelle zur Reduktion der Beobachtungen der Raumbereobachtungsverfahren sowie die zugehörigen Modellparameter. Damit hängt die Genauigkeit der Realisierung sowohl von der Genauigkeit der Messverfahren selbst, als auch von der Qualität der Reduktionsmodelle ab. In den Kapiteln 2.4 und 3 wird auf diese Festlegungen im Detail eingegangen.

2.2 Zälestisches Referenzsystem ICRS und seine Realisierung ICRF

Zur Beschreibung der dynamischen Bewegungsgleichung eines Punktes ist es sinnvoll, ein Bezugssystem zu wählen, in welchem keine Beschleunigungen auftreten. In einem solchen System, das als Inertialsystem bezeichnet wird, treten keine Scheinkräfte auf. In einem Inertialsystem gelten das erste und das zweite Newtonsche Axiom, nach denen sich ein kräftefreier Körper gleichförmig auf einer Geraden bewegt und eine einwirkende Kraft eine

Änderung der Geschwindigkeit proportional und in Richtung dieser Kraft bewirkt. Raumfeste Referenzsysteme, die durch eine Anzahl extragalaktischer Objekte realisiert werden, stellen Approximationen eines solchen Inertialsystems dar.

Nach den Spezifikationen der 21. Generalversammlung der Internationalen Astronomischen Union (IAU) wurde das International Celestial Reference System (ICRS) konzipiert, welches von der IAU 1997 auf der 23. Generalversammlung als IAU Celestial Reference System verabschiedet wurde (FEISSEL und MIGNARD 1998). Der Ursprung des ICRS liegt im Baryzentrum des Sonnensystems. Der zälestische Pol ist gleich dem mittleren, mit Hilfe eines Präzessions- (LIESKE *et al.* 1977) und eines Nutationsmodells (SEIDELMANN 1982) präzidierten Pol der Erde zur Epoche J2000 (01.01.2000, 12:00 Uhr Weltzeit UT1) und ist konsistent zu dem Pol des früheren Sternkatalogs FK5 (HAZARD *et al.* 1971). Der Ursprung der Rektaszension ist definiert durch die mittlere Rektaszension von 23 Radioquellen aus einer Gruppe von Katalogen, deren Konsistenz durch Fixieren der Koordinaten der Quelle 3C273B auf die Werte des FK5-Katalogs gewährleistet wurde. Eine detaillierte Beschreibung genannter Festlegungen geben MCCARTHY und PETIT 2004.

Das ICRS wird realisiert durch den International Celestial Reference Frame (ICRF), der durch die Positionen extragalaktischer Radioquellen und Sterne beschrieben wird. Der aktuelle ICRF (ICRF-Ext.1) (<http://www.iers.org>, 10.06.2008) wird durch die Positionen von 667 Radioquellen zur Epoche J2000 beschrieben (GONTIER *et al.* 2006). Über die 212 mit der höchsten Genauigkeit bestimmten Quellen, die sogenannten *defining sources*, werden die Achsen des Referenzrahmens festgelegt. Die Quellenkoordinaten werden heute mit einer Genauigkeit von etwa 0.1 Millibogensekunden (mas) bestimmt, die vor allem durch Eigenbewegungen der Quellen limitiert ist. Neben den *defining sources* werden zwei weitere Gruppen von Radioquellen im ICRF unterschieden: *candidate sources* und *other sources*. Dabei sind *candidate sources* Quellen, deren Koordinaten wegen einer zu kurzen Beobachtungszeit noch nicht ausreichend genau bestimmt sind, um als *defining sources* klassifiziert zu werden. *other sources* sind Quellen, die eine messbare Eigenbewegung aufweisen.

Die Beobachtung der Radioquellen und damit die Realisierung des ICRS erfolgt mit Hilfe des Beobachtungsverfahrens VLBI (MA *et al.* 1998), das in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben wird. VLBI ist ein rein geometrisches Verfahren und liefert daher keinen Bezug zum Massenschwerpunkt der Erde. Allein aus VLBI ist es daher nicht möglich, ein geozentrisches ICRS zu realisieren. Durch Kombination von VLBI- und Satellitenbeobachtungen oder durch Referenzierung der VLBI-Stationen in einem geozentrischen aus Satellitenbeobachtungen berechneten Referenzrahmen kann aber ein geozentrisch gelagerter ICRF berechnet werden.

Erfolgt unter Berücksichtigung relativistischer Effekte eine Verlagerung des Koordinatenursprungs des ICRS vom Baryzentrum des Sonnensystems in das Massenzentrum der Erde, erfährt das System aufgrund der Bewegung der Erde um die Sonne geringfügige Beschleunigungen. Es ist dann kein Inertialsystem im eigentlichen Sinne. Für viele Anwendungen ist diese Approximation eines Inertialsystems, die auch als *Quasi-Inertialsystem* bezeichnet wird, aber ausreichend genau.

2.3 Transformation zwischen zälestischem und terrestrischem System

Sind sowohl das raumfeste als auch das erdfeste Referenzsystem im Massenzentrum der Erde gelagert, kann die Transformation zwischen beiden Systemen durch Rotationen um drei Eulersche Winkel ausgedrückt werden. Aufgrund der einfacheren physikalischen Beschreibung und Interpretation und aus historischen Gründen wird die Transformation jedoch durch mehrere Rotationsmatrizen dargestellt:

$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{N}(t)\mathbf{R}_3(-\Theta)\mathbf{R}_1(y)\mathbf{R}_2(x)\mathbf{x}_e(t) \quad (2.1)$$

mit	t	Beobachtungsepoche in TT (Terrestrial Time)
	$\mathbf{x}_i(t)$	Vektor im raumfesten inertialen System zur Epoche t
	$\mathbf{x}_e(t)$	Vektor im erdfesten System zur Epoche t
	$\mathbf{P}(t)$	Präzessionsmatrix zur Epoche t
	$\mathbf{N}(t)$	Nutationsmatrix zur Epoche t
	$\mathbf{R}_i(\alpha)$	Drehmatrix mit dem Winkel α um Achse i
	Θ	wahre Sternzeit von Greenwich zur Epoche t
	x, y	Koordinaten des Celestial Ephemeris Pole (CEP) im erdfesten Referenzsystem zur Epoche t .

Gravitationskräfte von Sonne und Mond auf die Äquatorwulst der Erde erzeugen Drehmomente, die die Äquatorebene in die Richtung der Ekliptikebene zu zwingen trachten (TORGE 2002). Die rotierende Erde weicht diesem Zwang senkrecht zur Ebene der angreifenden Kräfte durch eine Kreiselbewegung, die Präzession, aus. Die Rotationsachse beschreibt dabei einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von 23.5° um den Pol der Ekliptik. Die Umlaufdauer beträgt ca. 25780 Jahre. Der größte Anteil der Präzession wird von Sonne und Mond verursacht und wird daher auch als lunisolare Präzession bezeichnet. Hinzu kommen noch kleine durch Planeten bewirkte Anteile, die sogenannte planetare Präzession und ein relativistischer Anteil. Die Präzessionsmatrix \mathbf{P} beschreibt die Transformation des raumfesten Äquatorsystems zu einer Standardepoche, beispielsweise J2000, in das mittlere zälestische Äquatorsystem zur Epoche t . Das mittlere zälestische Äquatorsystem mit einem mittleren Frühlingspunkt und einer mittleren Äquatorebene unterliegt damit der Bewegung der Präzession, nicht aber der im Folgenden beschriebenen Nutationsbewegung.

Die die Präzession erzeugenden Kräfte sind aufgrund der sich verändernden relativen Lage von Sonne und Mond zur Erde periodischen Schwankungen unterworfen. Diese werden unter dem Begriff der lunisolaren Nutation zusammengefasst. Der Hauptanteil der Nutation wird durch den Mond verursacht, dessen Bahnebene gegenüber der Ekliptik um etwa 5° geneigt ist. Die Schnittgerade von Ekliptik und Mondbahn umläuft die Ekliptik mit einer Periode von 18.6 Jahren. Dadurch wird eine Variation des Drehmoments des Mondes auf die Erde mit gleicher Periode induziert. Hinzu kommen jährliche und monatliche Variationen, die durch Sonne und Mond erzeugt werden. Die größere Halbachse der Nutationsellipse misst etwa $9.6''$, die kleinere $6.9''$. Die Nutationsmatrix \mathbf{N} beschreibt die Transformation vom mittleren zälestischen Äquatorsystem in das wahre zälestische Äquatorsystem. Der Pol des wahren zälestischen Äquatorsystems wird auch als zälestischer Ephemeridenpol (engl.: *Celestial Ephemeris Pole* (CEP)) bezeichnet. Modelle für die Berechnung der Nutation und Präzession finden sich in MCCARTHY und PETIT (2004). Zusätzlich werden vom IERS tägliche Korrekturwerte für die Nutation aus Beobachtungen geodätischer Raumbeobachtungsverfahren gerechnet und bereitgestellt (<http://www.iers.org>).

Der CEP zeichnet sich gegenüber dem tatsächlichen Rotationspol dadurch aus, dass er per Definition sowohl im raumfesten als auch im erdfesten System keine Bewegungen mit quasi-täglichen Perioden ausführt (SEIDELMANN 1992). Er hat damit eine besondere Bedeutung für die Transformation vom raumfesten ins erdfeste System. Die zum CEP weisende Achse (freie Drehimpulsachse der Erde) ist unabhängig von geophysikalischen Prozessen. Die Differenzen zwischen dem CEP und der tatsächlichen Drehimpulsachse, die den Gezeitenkräften von Sonne und Mond unterliegt (und in einer Ebene mit der Figurenachse und der tatsächlichen Rotationsachse der Erde liegt), können mit den sogenannten Oppolzer-Termen beschrieben werden (SCHÖDLBAUER 2000).

Zum 01.01.2003 wurde entsprechend einer Resolution der IAU, anstelle des CEP der intermediäre zälestische Pol (engl.: *Intermediate Celestial Pole* (CIP)) eingeführt. Dieser Wechsel steht in Zusammenhang mit der Einführung einer neuen Nutationstheorie, die der Notwendigkeit Rechnung trägt, die Polbewegung und die Nutationsbewegung klar zu trennen. Der CIP ist so definiert, dass er im raumfesten System keine Bewegungen mit Perioden kleiner als zwei Tagen und im erdfesten System keine quasi-täglichen retrograden Bewegungen ausführt. Der CIP führt jedoch prograde Bewegungen im erdfesten System mit Perioden von zwei Tagen und kürzer aus. Der bisherige Bezugspunkt für die Rektaszension, der mittlere Frühlingspunkt, wird ersetzt durch den zälestischen Ephemeridenursprung (engl.: *Celestial Ephemeris Origin* (CEO)). Er ist so definiert, dass er keine siderische Bewegung (Präzessionsbewegung) entlang des wahren Äquators ausführt. Er wird daher auch als nicht-rotierender Ursprung (engl.: *non-rotation origin*) bezeichnet. Das entsprechend überarbeitete Präzessions- und Nutationsmodell IAU2000 wird von SOUCHAY *et al.* (1999) und MATHEWS *et al.* (2002) beschrieben.

Die Transformation vom wahren zälestischen Äquatorsystem in das erdfeste System geschieht mit Hilfe der Erdrotationsparameter (Θ , x und y). Zunächst erfolgt der Übergang in das terrestrische Äquatorsystem über die Rotationsmatrix \mathbf{R}_3 . Sie beschreibt eine Drehung um die Rotationsachse um den Winkel Θ der Greenwicher wahren Sternzeit (GAST) in Bezug auf den wahren Frühlingspunkt. Da der wahre Frühlingspunkt periodische Nutationsbewegungen ausführt, unterliegt auch der Winkel GAST diesen Variationen (SCHÖDLBAUER 2000). Die wahre Greenwicher Sternzeit steht über die Gleichung der Äquinoktien in direktem Zusammenhang zu der für UT1=0 Uhr geltenden mittleren Greenwicher Sternzeit (GMST) (der Unterschied ist die Rektaszensionskomponente der Nutation des wahren Frühlingspunkts (SCHÖDLBAUER 2000)) und damit zur Weltzeit UT1. Der Unterschied zwischen GMST und UT1 ist die Rektaszension der mittleren Sonne + 12 Stunden (AOKI *et al.* 1982). Die mit Hilfe von Atomuhren realisierte Atomzeit (UTC) weicht von der Weltzeit UT1 etwas ab. Es gilt:

$$\text{UT1} = \text{UTC} - \Delta\text{UT1}. \quad (2.2)$$

Der Winkel Θ lässt sich abgesehen vom Anteil ΔUT1 mit Hilfe von Modellen beschreiben, wie sie zum Beispiel in MCCARTHY und PETIT (2004) angegeben werden. ΔUT1 wird aus geodätischen Raumbeobachtungsverfahren

bestimmt und vom IERS in Form von täglichen Werten zur Verfügung gestellt (beispielsweise in der IERS-C04 Reihe (<http://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc04/>)).

Anstelle der Änderung der Rotationsphase ΔUT1 findet aufgrund der besseren Anschaulichkeit auch häufig die sogenannte Tageslängenänderung (engl.: *excess of length of day* (ΔLOD)) Anwendung. Sie bezeichnet die Abweichung der astronomisch bestimmten Länge eines Sonntages (LOD) von einem mittleren Sonntag mit einer Dauer von 86400 s. LOD berechnet sich aus ΔUT1 wie folgt (MORITZ und MÜLLER 1987):

$$\text{LOD} = -\frac{d}{dt}\Delta\text{UT1}. \quad (2.3)$$

UT1 und LOD variieren vor allem infolge von Gezeiten, atmosphärischer und ozeanischer Zirkulation und Massenbewegungen im Erdinneren (TORGE 2002).

Der Übergang vom terrestrischen Äquatorsystem ins erdfeste System erfolgt schließlich mit Hilfe der Rotationsmatrizen $\mathbf{R}_1(y)$ und $\mathbf{R}_2(x)$. Sie beschreiben die Bewegung des CEP relativ zum IERS Reference Pole (IRP). Diese Bewegung wird auch als Polbewegung bezeichnet. Der IRP ist innerhalb $\pm 0.005''$ konsistent mit der Orientierung des terrestrischen Systems des Bureau International de l'Heure (BIH) 1984. 1967 wurde der BIH Referenzpol durch den *Conventional International Origin* (CIO) abgelöst (MCCARTHY 1996). Der IRP ist mit dem CIO auf $\pm 0.03''$ konsistent. Das aktuelle Internationale Terrestrische Referenzsystem ist so definiert, dass seine z-Achse in Richtung des IRP weist. Die x-Achse des Systems weist in Richtung des Greenwich-Meridians, die y-Achse in Richtung des Meridians mit 90° östl. Länge. Das ITRS wird durch einen Satz an Stationskoordinaten realisiert, die schließlich die tatsächliche Lage des Nullpunkts der Polkoordinaten x und y beschreiben.

Die Amplitude der nahezu kreisförmigen Polbewegung liegt bei maximal etwa $0.3''$. Den Hauptanteil stellt die sogenannte Chandlerbewegung mit einer Periode von etwa 435 Tagen. Sie ist eine freie Bewegung der Rotationsachse der elastischen Erde, die nicht durch äussere Kräfte erzwungen wird. Die freie Polbewegung resultiert aus der Tatsache, dass die Hauptträgheitsachse der Erde und ihre Rotationsachse nicht zusammenfallen (SCHÖDLBAUER 2000). Aufgrund der Anelastizität der Erde und den daraus resultierenden Reibungsverlusten ist die Chandlerschwingung eine gedämpfte Schwingung. In SEITZ (2004) wird gezeigt, dass kontinuierliche atmosphärische und ozeanische Anregungen der Dämpfung entgegenwirken und Variationen der Chandleramplitude induzieren.

Eine weitere wesentliche Komponente der Polbewegung ist eine jährliche Variation. Sie wird, wie auch eine Reihe weiterer höherfrequenter Signale, durch geophysikalische und gravitative Antriebe angeregt, die durch Massenverlagerungen im Erdsystem hervorgerufen werden. Die Beschreibung der Polbewegung mit Hilfe von Modellen ist bislang unzureichend. Aus diesem Grunde müssen die Polkoordinaten aus den Beobachtungen geodätischer Raumberechnungsverfahren abgeleitet werden. Dies ist heute mit einer Genauigkeit von weniger als 0.05 mas möglich (<http://www.iers.org>).

Neben den genannten Einflüssen führen Wechselwirkungen zwischen dem Erdkern und dem Erdmantel zu unregelmäßigen, quasi-täglichen Polschwankungen mit Amplituden von etwa 0.1 mas. Diese Bewegung wird als „freie Kern-Nutation“ (engl.: *Free Core Nutation* (FCN)) bezeichnet. Atmosphärische und ozeanische Anregungen der Erdrotation führen zu einer Verstärkung der FCN. Die Wechselwirkungen von Kern und Mantel bewirken selbst nur einen Bruchteil der Schwankungen (BRZEZINSKI und BOLOTIN 2006). Da die Darstellung dieser Bewegung im terrestrischen System eine subtägliche Auflösung der Polkoordinaten erfordern würde, wird die FCN als langperiodische Schwankung des Pols im zälestischen System mit einer Periode von etwa 432 Tagen dargestellt (MATHEWS 2000). Die FCN wird somit zwar als Nutationsanteil behandelt, da sie aber durch Vorgänge im Erdsystem angeregt ist, wird sie in den Nutationsmodellen (zum Beispiel IAU2000) nicht erfasst.

2.4 Zeitliche Veränderung und Deformation des Referenzrahmens

Verschiedene geophysikalische Prozesse führen zu Deformationen des Erdkörpers und damit zu zeitlichen Veränderungen der Positionen von Stationen auf der Erdoberfläche. Im Folgenden werden die wichtigsten dieser Deformationen beschrieben. Ein Teil der Effekte ist gut modellierbar und wird in den Softwarepaketen, die zur Auswertung der geodätischen Beobachtungen zur Verfügung stehen, berücksichtigt, indem die Beobachtungen um die Modellwerte reduziert werden. Andere Deformationen sind mit den heutigen Methoden nur unzureichend modellierbar und werden bisher in den Softwarepaketen noch nicht berücksichtigt (wie zum Beispiel Atmosphärenauflasten). Eine Quantifizierung dieser unzureichend modellierbaren Effekte ist notwendig, um Aussagen über die Gültigkeit des Referenzrahmens zu ermöglichen.

2.4.1 Tektonische Bewegungen

Die Lithosphärenplatten der Erde unterliegen Bewegungen, als deren Ursache Konvektionsströme im Erdmantel angenommen werden, die infolge von Temperaturunterschieden innerhalb des Erdmantels entstehen.

Die Bewegungen der Platten können durch kinematische Modelle erfasst werden. Wesentliche Annahmen für die Modellbildung sind (u. a. DIETRICH 1988):

- die Platten bewegen sich nur horizontal und können auf einer Kugel hinreichend genau beschrieben werden
- die Platten sind starr und bewegen sich nur relativ zueinander
- die Platten bewegen sich zeitlich linear.

Die Bewegung einer Platte kann damit als eine Rotation um einen Pol auf der Erdoberfläche, den sogenannten EULER-Pol, aufgefasst werden. Die zeitliche Abhängigkeit der kartesischen Koordinaten eines Punktes i der Platte k kann auf Zeitskalen, die sehr viel kürzer sind als die Rotationsperiode der Platte, beschrieben werden als:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{i_0} + (\boldsymbol{\omega}^k \times \mathbf{r}_{i_0})(t - t_0). \quad (2.4)$$

mit \mathbf{r}_i Koordinatenvektor der Station i zum Zeitpunkt t
 \mathbf{r}_{i_0} Koordinatenvektor der Station i zum Zeitpunkt t_0
 $\boldsymbol{\omega}^k$ Vektor der Winkelgeschwindigkeit der Platte k
 und $\mathbf{v}_i = \boldsymbol{\omega}^k \times \mathbf{r}_{i_0}$ Geschwindigkeit der Station i .

Aktuelle Modelle zur Beschreibung der Plattenbewegung basieren entweder auf geodätischen Messungen oder auf geophysikalischen Modellen. Zwei dieser Modelle sollen kurz beschrieben werden:

Das Modell NNR-NUVEL-1A (DEMETS *et al.* 1994) beschreibt die Bewegung von 16 als stabil angenommenen Platten. Es basiert auf geophysikalischen Daten, die sehr weit in die Erdgeschichte zurückreichen. Das Modell NNR-NUVEL-1A erfüllt eine „no-net-rotation-Bedingung“ (NNR-Bedingung), nach der das Integral über die Rotationen ($\mathbf{v} \times \mathbf{r}$) aller Punkte der Erdoberfläche Null wird. Das Modell wurde als Grundlage für die bisherigen ITRS-Realisierungen verwendet.

Das APKIM-Modell (engl.: *Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model*) (DREWES 1998), das die NNR-Bedingung erfüllt, basiert ausschließlich auf geodätischen Beobachtungen. Neben den Platten enthält es zusätzlich einige Deformationszonen. Für die neueste Version des Modells (APKIM2005) wurden die Geschwindigkeiten der Stationen des ITRF2005 verwendet. In APKIM werden 18 Hauptplatten und fünf Deformationszonen erfasst. Die Deformationszonen Alpen, Persien-Tibet-Burma, Alaska-Yukon, Gorda-Kalifornien und Anden werden gesondert mit Hilfe eines Deformationsmodells modelliert (DREWES und HEIDBACH 2005). Dadurch ergeben sich für diese Regionen Unterschiede in den Geschwindigkeiten gegenüber NNR-NUVEL-1A von teilweise mehreren Zentimetern pro Jahr (DREWES 2002). Eine weitere Ursache für Abweichungen zwischen beiden Modellen ist, dass in APKIM nur geodätische Beobachtungen aus den letzten 20-30 Jahren eingehen, während NUVEL-1A sehr lange Zeiträume (Millionen Jahre) betrachtet und deshalb die rezenten Plattenbewegungen nur hinlänglich erfasst (DREWES *et al.* 2006).

2.4.2 Gezeitendeformation des Erdkörpers

Die gravitativen Anziehungskräfte externer Himmelskörper (Sonne, Mond und Planeten) bewirken eine direkte oder indirekte Deformation des elastischen Erdkörpers (TORGE 2002). Dabei wird der direkte Effekt (Primäreffekt) als *Gezeiten des Erdkörpers* bezeichnet. Indirekte Effekte sind die durch die Verlagerung der Erdrotationsachse hervorgerufenen sogenannten Polgezeiten und Auflastdeformationen der Erdkruste durch die gezeitenbedingte Verlagerung der Ozeanwassermassen. Die indirekten Effekte werden in den beiden folgenden Abschnitten beschrieben.

Die Gezeiten des Erdkörpers lassen sich aufspalten in einen zeitabhängigen und einen zeitunabhängigen Teil, die sogenannte permanente Tide. Die Perioden der zeitabhängigen Anteile des gezeitenerzeugenden Potentials reichen von Stunden bis zu 18.6 Jahren (Partialtiden). Die Reduktion der beobachteten Stationspositionen um die zeitabhängigen Anteile der Gezeiten des Erdkörpers ergibt die sogenannte mittlere (Erd-)Kruste (engl.: *mean*

crust). Die zusätzliche Reduktion der Stationspositionen um die permanente Tide entspricht einer von Sonne, Mond und Planeten völlig unbeeinflussten Erdfigur (engl.: *tide free*). Der Polradius der Erde ist in diesem System um 38 cm größer als im *mean crust*-System, der Äquatorradius um 18 cm kleiner (MÜLLER und TESMER 2002).

Die Berücksichtigung der Gezeiten des Erdkörpers bei der Auswertung geodätischer Beobachtungen kann mittels des in MCCARTHY und PETIT (2004) angegebenen Modells geschehen. Die Berechnung der permanenten sowie der zeitabhängigen Deformation der Erdkruste aus dem gezeitenerzeugenden Potential erfolgt unter Verwendung nomineller LOVEScher und SHIDAScher Zahlen, wobei eine Frequenz- und Breitenabhängigkeit dieser Werte berücksichtigt wird. Ein auf der Grundlage dieser Konvention berechneter terrestrischer Referenzrahmen wird als *conventional tide free* bezeichnet. Dieses System wird für die Berücksichtigung der Gezeiten des Erdkörpers bei der Berechnung von Stationspositionen aus geodätischen Raumberechnungsverfahren verwendet. Für den Übergang vom *conventional tide free*-System auf ein wahres *tide free*-System wird zunächst die permanente Gezeitendeformation unter Verwendung der konventionellen LOVESchen und SHIDASchen Zahlen an das *conventional tide free*-System angebracht und so das *mean crust*-System erhalten. Die Transformation in das *tide free*-System geschieht dann durch erneute Reduktion der permanenten Deformation unter Verwendung der entsprechenden säkularen (oder *fluid limit*) LOVESchen Zahl (MCCARTHY und PETIT 2004).

2.4.3 Rotationsdeformation infolge der Polbewegung (Polgezeiten)

Bedingt durch die Verlagerung der Rotationsachse (Polbewegung) ändert sich das aus der Rotation der Erde resultierende Zentrifugalpotential. Die durch die Potentialänderung hervorgerufene Deformation des Erdkörpers hat dominante Anteile mit Perioden von einem Jahr und etwa 435 Tagen (Periode der Chandler-Schwingung) entsprechend den dominanten Perioden der Polbewegung und einen säkularen Anteil, der durch die *Wanderung des mittleren Pols* verursacht wird. Für eine maximale Amplitude der Polbewegung von etwa 400 mas, erreicht die Deformation in radialer Richtung Werte von bis zu 25 mm und für die horizontale Komponente etwa 7 mm (GIPSON und MA 1998). Schwankungen der Tageslänge (also der Variation der Rotationswinkelgeschwindigkeit der Erde) führen gleichfalls zu einer Änderung des Zentrifugalpotentials. Die resultierenden Deformationen liegen jedoch im Bereich von unter einem Millimeter (WAHR 1985) und können vernachlässigt werden. Die Berechnung der Deformation aus der Änderung des Zentrifugalpotentials erfolgt unter Verwendung der LOVESchen und SHIDASchen Zahlen, die auch für die Berechnung der direkten Gezeitendeformation des Erdkörpers verwendet werden (MUNK und McDONALD 1960).

In den Konventionen des IERS (MCCARTHY und PETIT 2004) wird vorgeschlagen, nur die periodischen Anteile der Rotationsdeformation zu korrigieren. Der säkulare Effekt wird dann in den Geschwindigkeiten der Stationspositionen abgebildet. Zur Berechnung der periodischen Anteile werden die Polkoordinaten um eine mittlere Polbewegung reduziert. Für die Beschreibung dieser säkularen Bewegung wird von MCCARTHY und PETIT (2004) ein lineares Modell angegeben.

2.4.4 Auflastdeformation

Zeitvariable Massenauflasten auf der Erdoberfläche bewirken Flächenkräfte auf die Erdkruste, die eine Lage- und Höhenänderung der Punkte auf der Erdoberfläche hervorrufen. Als Beispiele können veränderliche Auflasten durch Atmosphäre (Luftdruckvariationen), Ozeane (Gezeiten und Meeresströmungen) und die kontinentale Wasserspeicherung (auch in Form von Schnee und Eis) genannt werden. Es wird zwischen einer elastischen und einer viskosen Reaktion der Erdkruste auf die Auflasten unterschieden.

Die elastische Reaktion ist die Kompression (beziehungsweise Dekompression) der Erdkruste als sofortige Wirkung auf eine Auflaständerung (LAMBECK 1988). Die viskose Reaktion ist eine langanhaltende Ausgleichsbewegung. Im Gegensatz zur elastischen Reaktion sind die Elastizitätsparameter, die die viskose Reaktion der Erdkruste beschreiben, zeitabhängig. Neben den überwiegend vertikalen Deformationen treten auch horizontale Bewegungen auf. Ihre Beträge liegen bei etwa 18-20% der Vertikalbewegung (JAMES und IVINS 1998).

Messbare elastische Ausgleichsbewegungen sind die Reaktion der Erdkruste auf die Variabilität des Luftdrucks, die Variabilität des Ozeanbodendrucks und saisonale Änderungen von Schnee- und Eisauflasten. Viskose Ausgleichsbewegungen, die einen derzeit messbaren Effekt auf die Stationspositionen haben, sind die Reaktion der Erdkruste auf langanhaltende Massenänderungen mit nicht-periodischem Charakter, wie langfristige Eismassenänderungen verursacht durch Klimaänderungen und die langzeitige Änderung des mittleren Meeresspiegels. Mit Hilfe der LOVESchen Zahlen für die Flächenkräfte können die Verschiebungsbeträge aus der durch die Auflaständerung induzierten Potentialänderung berechnet werden (LAMBECK 1988; MCCARTHY und PETIT 2004). Die LOVESchen Zahlen sind abhängig vom zugrundeliegenden Erdmodell und dem ausgewählten Satz GREENScher

Funktionen (zur Beschreibung des Grenzwertproblems). Gegenwärtig stehen zwei sogenannte SNREI (spherical non-rotating, elastic, isotropic) Erdmodelle zur Verfügung, die die Geometrie, die mechanischen Eigenschaften und die Rheologie des Erdkörpers beschreiben: das Preliminary Reference Earth Model (PREM) (DZIEWONSKI und ANDERSON 1981) und das Gutenberg-Bullen A - Modell zu welchem von FARRELL (1972) LOVEsche Zahlen berechnet wurden. Studien haben gezeigt, dass die Unterschiede zwischen den LOVEschen Zahlen beider Modelle maximale Differenzen in der vertikalen Auflastdeformation von 0.04 mm bewirken und damit unbedeutend im Hinblick auf die gegenwärtig erreichte Genauigkeit geodätischer Beobachtungen sind. Jedoch sind beide Erdmodelle unzureichend für eine Modellierung der Auflastdeformation mit einer Genauigkeit von 1 mm oder besser, da in diesen Modellen die Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften des Erdkörpers vom Ort der aufliegenden Masse nicht berücksichtigt ist.

Von SEITZ und KRÜGEL (2009) wurde ein einfacher alternativer Ansatz entwickelt, in dem die vertikale Deformation der Erdkruste als Reaktion auf eine Auflast durch eine Exponentialfunktion beschrieben wird. Die vertikale Deformation Δv_P eines Punktes P auf der Erdoberfläche wird damit wie folgt berechnet:

$$\Delta v_P = -ae^{-b\phi_{PQ}}. \quad (2.5)$$

In dieser Gleichung ist ϕ_{PQ} die sphärische Distanz zwischen dem Punkt P und dem Ort der Auflast Q. Durch eine ortsabhängige Wahl der Parameter a und b werden regionale Dichteunterschiede der Erdkruste berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass ein solcher ortsabhängiger Ansatz in einigen Regionen zu einer signifikant verbesserten Beschreibung der Auflastdeformationen führt. Dies gilt insbesondere für Regionen, in denen starke jahreszeitliche vertikale Stationsbewegungen beobachtet werden (zum Beispiel Sibirien, die arktischen Gebiete Nordamerikas und die Golfregion).

2.4.4.1 Auflastdeformation verursacht durch Ozeanmassenvariationen

Ozeangezeiten werden wie die Gezeiten des Erdkörpers durch gravitative Anziehungskräfte von Sonne, Mond und Planeten hervorgerufen. Die zeitlichen Variationen der Ozeanmassen bewirken zeitvariable Auflastdeformationen der Erdkruste. Die induzierten Deformationen sind somit ein sekundärer gezeitenbedingter Effekt. Sie können für die vertikale Komponente Werte von einigen Zentimetern (HAAS und SCHERNECK 1999), für die horizontalen Komponenten von einigen Millimetern erreichen (SCHERNECK und HAAS 1999). Aktuelle Modelle geben in Abhängigkeit von der Position auf der Erdoberfläche Amplituden und Phasen für ausgewählte Partialtiden an. Die lokale Verschiebung eines Punktes Δ (Komponenten Δ_j) im lokalen Horizontsystem ergibt sich aus der Summation der Deformationen, die durch die Partialtiden $i = 1$ bis N induziert werden (MCCARTHY und PETIT 2004):

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^N f_i \xi_{ij} \cos(\omega_i t + \chi_i + u_i - \phi_{ij}) \quad (2.6)$$

mit	Δ_j	Verschiebung einer Station in Nord-, Ost- oder Höhenrichtung (Komponente j , $j = \text{Nord, Ost oder Höhe}$)
	ξ_{ij}	Amplitude der Partialtide i für die Komponente j
	ϕ_{ij}	Phase der Partialtide i für die Komponente j
	ω_i	Frequenz der Partialtide i
	χ_i	Astronomisches Argument der Partialtide i zu 0 Uhr
	f_i, u_i	Größen, abhängig von der Länge des Mondknotens (DOODSON 1928).

Üblicherweise werden die Effekte der elf dominanten Partialtiden berücksichtigt (MCCARTHY und PETIT 2004). Dazu gehören die subtäglichen Partialtiden M_2, S_2, N_2, K_2 , die täglichen Partialtiden K_1, O_1, P_1, Q_1 und die langperiodischen Partialtiden M_f, M_m und S_{sa} . Als Grundlage für die Auflastmodellierung werden Ozeangezeitenmodelle verwendet. In den IERS Konventionen wird die Verwendung der aktuellen Modelle GOT00.2 (abgeleitet aus Altimeterdaten von TOPEX/POSEIDON) (RAY 1999) und FES99 (aus einer hydrodynamischen Lösung in welche TOPEX/POSEIDON-Daten assimiliert wurden) (LEFEVRE *et al.* 2002) empfohlen. Beide Modelle haben eine räumliche Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Für die vorliegende Arbeit wurde das aktuelle Folgemodell des FES99, das FES2004, mit einer räumlichen Auflösung von $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ verwendet.

Ein Dienst zur Berechnung von Ozeanauflastkoeffizienten (Amplituden und Phasen der Partialtiden) wird unter <http://www.oso.chalmers.se/loading> angeboten. Dabei kann zwischen verschiedenen Ozeangezeitenmodellen gewählt werden. Die Koeffizienten werden unter der Annahme punktueller Auflasten berechnet. Die Durchbiegung der Erdkruste in der Umgebung der Auflast wird mittels GREENScher Funktionen modelliert (FARRELL 1972, SCHERNECK 1991).

Zusätzlich zu den Ozeangezeiten treten Massenverlagerungen im Ozean auf, die durch die Änderung des Zentrifugalpotentials der Erde infolge der Polbewegung induziert werden (sog. Ozeanpolgezeiten). Die daraus resultierenden Deformationen erreichen Werte von maximal 1.8 mm in der radialen Komponente und 0.5 mm in den horizontalen Komponenten (DESAY 2002). Sie werden in den Berechnungen für die vorliegende Arbeit nicht berücksichtigt.

Neben den periodischen und damit gut modellierbaren gezeitenbedingten Ozeanmassenverlagerungen ändert sich die Verteilung der ozeanischen Wassermassen episodisch. Ursachen hierfür sind die allgemeine thermohaline und windgetriebene und die durch Luftdruckänderungen verursachte Zirkulation (THOMAS *et al.* 2001). Daneben bestehen regelmäßig (wenn auch nicht streng periodisch) auftretende großskalige Ozeanmassenverlagerungen aufgrund von bestimmten Großwetterlagen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die etwa alle 5-7 Jahre auftretende *El Niño Southern Oscillation*. Die Modellierung dieser Effekte ist sehr schwierig und wird in den Auswertungen geodätischer Beobachtungen bisher nicht berücksichtigt.

2.4.4.2 Deformation durch Atmosphärenauflast

Zeitvariable Luftdruckänderungen verursachen ebenso wie die Variation der Ozeanwassermassen Deformationen der Erdkruste. So können zum Beispiel in mittleren Breiten in einem Entfernungsbereich von 1000-2000 km Druckunterschiede von 20 hPa und größer mit Perioden von etwa zwei Wochen auftreten (MCCARTHY und PETIT 2004). Saisonale Druckvariationen infolge von Massenaustausch zwischen kontinentalen und maritimen Luftmassen erreichen Amplituden von etwa 10 hPa. Theoretische Studien von RABELL und J.ZSCHAU (1985), VANDAM und WAHR (1987) und anderen zeigen, dass die Druckvariationen vertikale Deformationen der Erdkruste von bis zu 25 mm bewirken können. Die horizontale Deformation beträgt etwa ein Drittel der vertikalen. Empirische Studien hierzu wurden von MACMILLAN und GIPSON (1994) und VANDAM *et al.* (1994) sowie von KANIUTH und VETTER (2006) durchgeführt. Die größten Effekte sind wegen der stärker ausgeprägten Wetterlagen für höhere Breiten zu erwarten. Im Bereich der Küsten (bis etwa 500 km landeinwärts) ist der Effekt dagegen deutlich geringer, da auftretende Luftdruckänderungen teilweise durch ausgleichende Ozeanmassenverlagerungen kompensiert werden (sog. invers-barometrische Reaktion des Ozeans). Im Gegensatz zu den dominanten Gezeitenauflasten des Ozeans werden die Atmosphärenauflasten nicht durch gut bekannte, zyklisch ablaufende physikalische Prozesse hervorgerufen und können daher nicht als periodische Funktionen approximiert werden.

Bislang existieren zwei Ansätze zur Modellierung atmosphärischer Auflasten. Der erste geophysikalische Ansatz basiert auf der Schätzung des atmosphärisch bedingten Auflasteffekts aus den Daten globaler Druckfelder, wobei die durch die Auflast hervorgerufene Durchbiegung der Erdkruste mit Hilfe von GREENSchen Funktionen beschrieben wird. Dieser Ansatz ist analog zu jenem, der für die Berechnung der Ozeangezeitenauflasten verwendet wird. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass der Effekt in standardisierter Form für jeden Punkt der Erdoberfläche berechnet werden kann. Nachteilig ist dagegen, dass dieser Ansatz globale Wetterdaten erfordert. Aktuelle Druckdaten sind aber nur mit etwa 24-stündiger Verzögerung verfügbar. Zudem sind die Ergebnisse abhängig von der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Druckdaten, den Unsicherheiten der GREENSchen Funktionen und dem Modell, das den invers-barometrischen Effekt des Ozeans beschreibt (MCCARTHY und PETIT 2004). Als globale Wetterdatensätze stehen beispielsweise die Reanalysen der National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) (KALNAY *et al.* 1996) mit einer räumlichen Auflösung von $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ und einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden sowie die operationellen Analysen des European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) (GIBSON *et al.* 1997) mit einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ und einer zeitlichen Auflösung von 3 Stunden zur Verfügung. Ein Vergleich beider Datensätze zeigt Differenzen von bis zu 14 hPa. Dies entspricht einem Unterschied in der vertikalen Deformation von 3 mm, der im Hinblick auf die Genauigkeit der geodätischen Beobachtungen signifikant ist. Hier wird die Unsicherheit der berechneten Auflastdeformationen deutlich. Es zeigt sich ein unbedingter Verbesserungsbedarf der Atmosphärenmodelle, um eine Berechnung der Auflastdeformation mit einer Genauigkeit von 1 mm zu ermöglichen.

Im zweiten empirischen Ansatz werden lokale Atmosphärenauflasteffekte berechnet, indem der Zusammenhang zwischen vertikalen Stationsbewegungen und Luftdruckvariationen aus bereits vorhandenen Beobachtungen bestimmt wird. Der Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass geodätische Beobachtungen über einige Jahre vorliegen müssen, bevor Regressionsfaktoren bestimmt werden können. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Werte

einer Station nicht auf eine andere übertragen werden können, sondern für jede Station ein eigener Regressionsfaktor bestimmt werden muss. Außerdem sind sie abhängig von der Zeit und dem geodätischen Beobachtungsverfahren. Die Bestimmung der Regressionskoeffizienten wird auch durch andere mit den Luftdruckvariationen korrelierte geodätische Signale beeinflusst (zum Beispiel durch die Auflastdeformation aufgrund der Variation kontinentaler Wassermassen) (MCCARTHY und PETIT 2004).

In einem hybriden Ansatz werden Regressionskoeffizienten nicht durch Korrelation mit Beobachtungsreihen von Stationskoordinaten sondern unter Verwendung eines geophysikalischen Modells berechnet. Der Vorteil ist, dass dabei der Einfluss der Luftdruckänderungen unabhängig von anderen geophysikalischen Signalen betrachtet werden kann. Die Regressionskoeffizienten werden bestimmt, indem lokale Luftdruckbeobachtungen bestmöglich an prädierte Stationsbewegungen aus dem geophysikalischen Modell angepasst werden. Die Regressionskoeffizienten, die auf diese Weise erhalten werden, unterliegen aber sowohl dem Einfluss der Unzulänglichkeiten der GREENSchen Funktionen als auch dem der Unsicherheiten des Wettermodells (MCCARTHY und PETIT 2004).

Von MCCARTHY und PETIT (2004) wird die Verwendung des geophysikalischen Ansatzes empfohlen. Er ermöglicht eine einheitliche Modellierung der Auflastdeformation für alle Beobachtungstechniken und Stationen. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist damit gewährleistet, auch wenn nicht die größtmögliche Genauigkeit erreicht wird.

Seit 2004 werden vom IERS Special Bureau for Loading (SBL) durch atmosphärische, ozeanische und hydrologische Auflasten hervorgerufene Deformationen für eine Auswahl an Stationen (nämlich die des ITRF2000, EUREF und ESEAS (European Sea Level Service)) angeboten (<http://www.sbl.statkart.no/>). Die Zeitreihen reichen zurück bis zum Jahr 1985 und stehen damit auch für die Reprozessierung von geodätischen Beobachtungen zur Verfügung. Für eine Reihe von Stationen werden vom SBL auch Regressionskoeffizienten zur Verfügung gestellt.

Ein bisher nicht erwähnter aber grundlegender Aspekt ist die Definition eines Referenzluftdrucks und damit einer mittleren Stationsposition, auf die sich die Deformation beziehen soll. Bisher gibt es dafür keine eindeutige Festlegung in den Konventionen des IERS. Vom SBL wird derzeit eine aus 10 Jahren berechnete mittlere Stationshöhe als Referenz verwendet (2004 IERS Annual Report).

2.4.4.3 Deformation durch Variation kontinentaler Wassermassen

Die Variabilität kontinentaler Wassermassen durch zeitvariable Schneebedeckung, Bodenfeuchte und Grundwasserspeicherung kann vertikale Deformationen der Erdkruste von bis zu 30 mm verursachen, wie anhand von Untersuchungen mit einem hydrologischen Modell gezeigt wurde (VANDAM *et al.* 2001). Signalanteile mit jährlicher Periode sind dabei dominant, weisen aber in Abhängigkeit vom Ort sehr unterschiedliche Amplituden auf. Werden nur die saisonalen Auflastdeformationen betrachtet, so ist der Effekt der kontinentalen Hydrologie für viele Regionen größer als der der Atmosphäre (BLEWITT *et al.* 2001). Insbesondere in den Monsungebieten Asiens, den tropischen Teilen Südamerikas und Afrikas, sowie an der Westküste Kanadas und der Südwestküste Alaskas treten Spitzenwerte auf. Für die meisten kontinentalen Regionen werden Werte zwischen 9 und 15 mm erreicht (VANDAM *et al.* 2001). Neben den saisonalen treten auch langzeitige Variationen mit Perioden von mehreren Jahren auf. Diese können Hebungs- oder Senkungsraten von Punkten auf der Erdoberfläche von bis zu 2.5 mm/a hervorrufen.

Die Auflastdeformation durch die Variation kontinentaler Wassermassen ist damit genauso von Bedeutung wie die durch Ozean und Atmosphäre hervorgerufene. Dennoch wird der kontinentalen Hydrologie bislang weniger Beachtung geschenkt. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Kenntnis über die zugrundeliegenden Prozesse bisher gering und damit eine Modellierung der Massenänderung sehr schwierig ist.

Für die Beschreibung der kontinentalen Hydrologie stehen mehrere Modelle zur Verfügung. Sie sind jedoch zu ungenau, um die hydrologischen Auflastdeformationen mit der für die Reduktion geodätischer Beobachtungen erforderlichen Genauigkeit von besser als 1 mm zu beschreiben. Das *Land Dynamics (LaD) hydrology model* (MILLY und SHMAKIN 2002) beinhaltet in seiner aktuellen Version *Fraser* Datensätze über einen Zeitraum von 1980 bis heute mit einer räumlichen Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$. Dieselbe räumliche Auflösung bietet das NCEP-Hydrologiemodell *Climate Data Assimilation System 1* (CDAS-1), während das WGHM (*Water Gap Hydrology Model*) (DÖLL *et al.* 2003) mit einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ und das *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) (RODELL *et al.* 2004) mit einer räumlichen Auflösung von $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ vorliegen. Die zeitliche Auflösung aller Modelle beträgt ein Monat, was ihre Verwendbarkeit für die Reduktion geodätischer Beobachtungsdaten stark einschränkt.

2.4.4.4 Glazial-isostatische Ausgleichsbewegung

Das Abschmelzen großer kontinentaler Eisschilde Fennoskandiens, Grönlands, Kanadas und Sibiriens nach dem letzten glazialen Maximum vor etwa 21000 Jahren bewirkt eine Entlastung der Erdkruste und eine daraus resultierende säkulare isostatische Ausgleichsbewegung, die bis heute anhält (PELTIER 1994). Es handelt sich dabei um eine viskose Reaktion der Erdkruste. Die maximalen vertikalen Bewegungsraten betragen bis zu 10 mm pro Jahr (SCHERNECK *et al.* 2002). Zusätzlich treten horizontale Bewegungen auf, die etwa 18-20% der Vertikalbewegung betragen (JAMES und IVINS 1998). Aktuelle Modelle, die diese Ausgleichsbewegung beschreiben, sind das globale glazial-isostatische Modell ICE-5G(VM) von PELTIER (2004) sowie Modelle für die Antarktis, Grönland, Fennoskandien und Kanada (HUYBRECHTS 1992, HUYBRECHTS und LEMEUR 1998). Bei der Auswertung geodätischer Beobachtungen wird jedoch auf eine Modellierung verzichtet, da sich die Bewegungen in den betrachteten Zeiträumen von wenigen Dekaden gut als lineare Geschwindigkeit der Stationen approximieren lassen und mit hoher Genauigkeit geschätzt werden. Auch für die Geschwindigkeiten, die in den ITRF-Lösungen für die einzelnen Stationen angegeben werden, sind die postglazialen Ausgleichsbewegungen mit enthalten.

Neben den postglazialen Ausgleichsbewegungen treten Reaktionen der Erdkruste auf saisonale Akkumulations- und Ablationsprozesse kontinentaler Eismassen auf (DIETRICH *et al.* 1988). Diese elastischen Ausgleichsbewegungen der Erdkruste erfolgen unmittelbar auf die Änderungen der Auflast (LAMBECK 1988). Maximale vertikale Deformationen treten in der Region der großen Eisschilde der Antarktis und Grönlands auf. Sie erreichen Werte im Bereich mehrerer Zentimeter (SCHEINERT *et al.* 2006). Die Größe der Eismassenvariationen ist bislang nicht sehr gut bekannt, weswegen auch die daraus berechneten Krustenbewegungen nicht für eine Reduktion der geodätischen Beobachtungen um diesen Effekt geeignet sind. Die elastische Ausgleichsbewegung verbleibt deshalb in den Beobachtungen.

2.4.5 Weitere Effekte

Neben den genannten Ursachen für Stationsbewegungen gibt es weitere Effekte, die meist unregelmäßig auftreten und sehr schwer zu modellieren sind. Hier sind insbesondere Erdbeben zu nennen. Sie können sehr große Änderungen der Stationsposition bewirken. Neben einer Positionsänderung kommt es häufig auch zu einer Veränderung der Bewegungsrichtung der Station (post-seismische Bewegung).

Weitere Ursachen für Stationsbewegungen können Änderungen im geologischen Untergrund der Station beispielsweise durch Bergbau sein.

3. Raumbeobachtungsverfahren

Raumbeobachtungsverfahren sind Messverfahren, die mit Hilfe extra-terrestrischer Objekte (zum Beispiel Satelliten, Mond, Radiosterne) die Beobachtung von Vorgängen im Erdsystem ermöglichen. Ihre wichtigsten geodätischen Anwendungen sind die Bestimmung von Stationspositionen auf der Erdoberfläche und deren zeitlicher Veränderung, die Bestimmung von Quasarpositionen, die Beschreibung der Rotation der Erde und ihrer Orientierung im Weltraum und die Bestimmung des Erdschwerefeldes sowie dessen zeitlicher Variation.

Für die Berechnung eines globalen Referenzrahmens sind aktuell vier Raumbeobachtungsverfahren von Bedeutung: GPS, SLR, VLBI und DORIS.

In dieser Arbeit werden Beobachtungen der Verfahren GPS, SLR und VLBI verwendet. Für alle Beobachtungsverfahren gilt, dass sie einer Reihe von Einflüssen unterworfen sind, die, würden sie bei der Auswertung vernachlässigt, die erreichbare Genauigkeit mehr oder weniger stark limitieren. Die entsprechenden Effekte werden in der Datenanalyse durch Reduktion, Schätzung oder Elimination berücksichtigt. Im Folgenden werden die Verfahren erläutert und die Fehlereinflüsse sowie deren Berücksichtigung beschrieben.

3.1 Interferometrie auf sehr langen Basislinien - VLBI

3.1.1 Beobachtungsgleichung des VLBI-Verfahrens

In den letzten Jahrzehnten erlebte die Interferometrie auf sehr langen Basislinien eine enorme Aufschwung in der geodätischen Anwendung. In den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurden in vielen Bereichen der Astronomie, Geodäsie und Geophysik mit Hilfe der VLBI große Fortschritte erzielt (SOVERS *et al.* 1998). Die VLBI ist seit dieser Zeit eines der fundamentalen Verfahren zur Bestimmung der relativen Positionen von Punkten auf der Erdoberfläche, der relativen Positionen quasi-stellarer Radioquellen (Quasare) sowie der Erdrotation. Die VLBI ist das einzige Verfahren, das eine Beobachtung der Quasare und damit eine Bestimmung der Bewegungen der Erde im Inertialraum mit sehr hoher Genauigkeit ermöglicht. Sie spielt daher eine wichtige Rolle bei der Realisierung des terrestrischen und des zälestischen Referenzsystems. Einen weiteren Vorteil weist die VLBI gegenüber den Satellitenverfahren dadurch auf, dass keine Störkräfte auf Satellitenbahnen (zum Beispiel verursacht durch den Strahlungsdruck der Sonne) auftreten und modelliert werden müssen. Die VLBI liefert allerdings im Vergleich zu den Satellitenverfahren derzeit keine kontinuierlichen Beobachtungen. Geodätische VLBI-Beobachtungen finden nur zwei- bis dreimal pro Woche, dann aber kontinuierlich über etwa 24 Stunden (VLBI-Session) statt. Ein weiterer Nachteil der VLBI ist die niedrige Anzahl an Stationen, die an einer Beobachtungssession beteiligt sind, und deren inhomogene globale Verteilung.

Die VLBI basiert auf der von zwei oder mehr Stationen durchgeführten simultanen Beobachtung von Mikrowellensignalen, die von Quasaren emittiert werden. In der geodätischen VLBI werden insbesondere die beiden Frequenzen 8.4 GHz (X-Band) und 2.3 GHz (S-Band) verwendet. Diese entsprechen Wellenlängen von 3.5 cm beziehungsweise 13 cm.

Die Abbildung 3.1 zeigt die schematische Darstellung eines VLBI-Experiments. Zwei Teleskope, die Anfangs- und

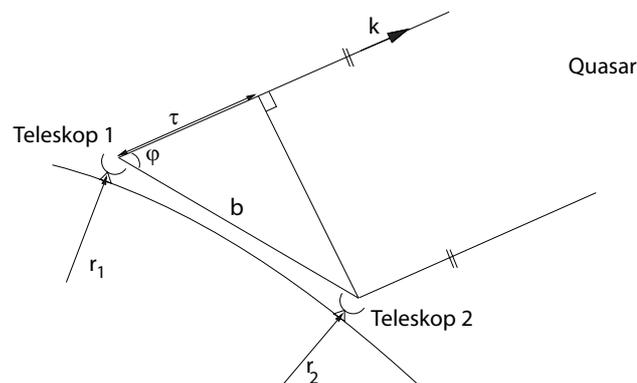


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung eines VLBI-Experiments.

Endpunkt der Basislinie \mathbf{b} markieren und auf eine Radioquelle ausgerichtet sind, beobachten eine Wellenfront mit der Ausbreitungsrichtung $-\mathbf{k}$, die aufgrund der großen Entfernung der betrachteten Radioquelle für beide Teleskope als gleich angenommen werden kann. Die Zeitdifferenz τ zwischen den Empfangszeitpunkten t_1 und t_2 der beiden Teleskope ist die eigentliche Beobachtungsgröße der VLBI:

$$\tau = t_1 - t_2 = \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{k}}{c_0} = \frac{|\mathbf{b}| \cos \varphi}{c_0} \quad \text{mit} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \cos \delta \\ -\sin \alpha \cos \delta \\ -\sin \delta \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{b} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad \text{wobei} \quad (3.2)$$

- t_1, t_2 Beobachtungszeitpunkte der beiden Teleskope
- c_0 Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- α, δ Rektaszension und Deklination der beobachteten Radioquelle im zälestischen Äquatorsystem
- r_1, r_2 kartesische Ortsvektoren der beiden Teleskope im geozentrischen Koordinatensystem

und

$$\varphi = -\frac{\Delta x \cos \alpha \cos \delta + \Delta y \sin \alpha \cos \delta + \Delta z \sin \delta}{|\mathbf{b}|}.$$

Die VLBI ist ein rein differentielles Verfahren, da die Beobachtungen eine Funktion der relativen Lage der Stationspositionen und der Radioquellen sind.

Eine VLBI-Beobachtungssession umfasst im Allgemeinen etwa 24 Stunden und startet zu einem je nach Netzkonfiguration festgelegten Zeitpunkt. Die Genauigkeit der aus der VLBI bestimmten geodätischen Parameter ist aufgrund der relativ geringen Anzahl an Stationen (im Vergleich zu anderen Raumbeobachtungsverfahren) und der Tatsache, dass zu einem Zeitpunkt immer nur eine Radioquelle beobachtet wird, sehr sensitiv gegenüber der Geometrie des Stationsnetzes, der Beobachtungsepoche und den lokalen Azimut- und Elevationswinkeln der jeweils beobachteten Radioquelle. Eine genaue Planung der Beobachtungen ist daher unabdingbar.

Der Zeitunterschied τ zwischen dem Eintreffen des Signals an den beiden Teleskopen wird durch die Korrelation der Beobachtungen der beiden Stationen bestimmt. Da die Basislinienlängen im Allgemeinen mehrere tausend Kilometer betragen und eine sehr große Menge an Daten vorliegt, die bisher nicht standardmäßig elektronisch übertragen werden kann, ist eine Korrelation der Beobachtungen in Echtzeit nicht möglich. Damit kann die VLBI bisher nur zur Schätzung von Parametern im sogenannten *post-processing* und zur Prädiktion von Parametern, nicht aber zu deren Bestimmung in Echtzeit beitragen. Der Internationale VLBI Dienst für Geodäsie und Astrometrie (engl: *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry* (IVS)) hat jedoch ein Programm mit dem Namen VLBI2010 gestartet, in dessen Verlauf die zukünftigen Anforderungen an die VLBI benannt und mögliche Wege zur Verbesserung des VLBI-Verfahrens aufgezeigt werden sollen (NIELL *et al.* 2005). Einer der wichtigsten Punkte des Programms ist die Beschleunigung der VLBI-Auswertung durch sehr schnelle elektronische Übertragung der Daten (*e-VLBI*).

Die VLBI-Beobachtungen werden von einer Reihe genauigkeitslimitierender Faktoren beeinflusst. Dazu zählen Einflüsse, die die Radioquellen, die Ausbreitungsmedien und die Stationen betreffen. Im Folgenden werden die wesentlichen Einflüsse kurz vorgestellt.

3.1.2 Fehlereinflüsse auf VLBI-Beobachtungen

Die VLBI-Beobachtungsgröße τ wird durch Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit c_0 in metrische Einheiten umgerechnet (vgl. Gleichung 3.1). Die ausführliche Beobachtungsgleichung für eine Basislinie zwischen den Stationen i und j ergibt sich unter Berücksichtigung der wesentlichen Fehlereinflüsse zu:

$$c_0 \tau_{ij} = |\mathbf{b}_{ij}| \cos \phi_{ij} - \delta \varrho_{I_i} + \delta \varrho_{T_i} + c_0 dt_i(t) + c_0 \delta \varrho_{t_i} + \delta \varrho_{o_i}(t) + \delta \varrho_{r_i} + \delta \varrho_{I_j} - \delta \varrho_{T_j} - c_0 dt_j(t - \tau_{ij}) - c_0 \delta \varrho_{t_j} - \delta \varrho_{o_j}(t) - \delta \varrho_{r_j} + e_{ij} \quad (3.3)$$

mit	$ \mathbf{b}_{ij} \cos \phi_{ij}$	geometrische Entfernung zwischen den Stationen i und j
	c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
	$\delta \varrho_{I_i}, \delta \varrho_{I_j}$	ionosphärische Laufzeitverzögerung für die Stationen i und j
	$\delta \varrho_{T_i}, \delta \varrho_{T_j}$	troposphärische Laufzeitverzögerung für die Stationen i und j
	dt_i, dt_j	Uhrenfehler der Stationen i und j
	$\delta \varrho_{t_i}, \delta \varrho_{t_j}$	instrumentelle Laufzeitverzögerung der Stationen i und j
	$\delta \varrho_{o_i}, \delta \varrho_{o_j}$	Ablage des Antennenphasenzentrums vom Referenzpunkt der Beobachtungen für die Stationen i und j
	$\delta \varrho_{r_i}, \delta \varrho_{r_j}$	relativistische Korrekturen der Stationen i und j
	e_{ij}	Fehlerterm, der Messfehler der Beobachtung sowie nicht ausreichend modellierte Fehlereinflüsse enthält.

3.1.2.1 Atmosphärische Einflüsse

a) Troposphärische Laufzeitverzögerung

Die Troposphäre ist für Mikrowellen kein dispersives Medium. Das bedeutet, ihr Einfluss auf die Ausbreitung von Mikrowellen ist frequenzunabhängig. Er kann nicht - wie die ionosphärische Refraktion - durch Linearkombination verschiedener Wellenlängen eliminiert, sondern muss in der Auswertung geschätzt werden. Sowohl die geodätische VLBI als auch das GPS-Verfahren arbeiten mit Mikrowellensignalen. Für beide ist daher der Einfluss der Troposphäre auf die Länge des Signalwegs analog und lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\Delta \varrho_T = (S - G) + \int_S (n - 1) ds. \quad (3.4)$$

Der erste Term beschreibt die Differenz zwischen tatsächlichem Signalweg S und dem Weg G , den das Signal ohne Atmosphäre nehmen würde. Auf diese Weise wird die Brechung des Signals berücksichtigt. Dieser Effekt wird bei der Umrechnung der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung in eine beliebige Elevationsrichtung mit berücksichtigt und kann in den folgenden Betrachtungen ausgeklammert werden.

Der zweite Term modelliert die Verzögerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang des Signalwegs S . Üblicherweise wird anstelle des Brechungsindex n die Refraktivität $N = 10^6(n - 1)$ verwendet, und Gleichung 3.4 wird zu:

$$\Delta \varrho_T = 10^{-6} \int_S N ds. \quad (3.5)$$

Die Refraktivität ist von Temperatur, Luftdruck und Wasserdampfdruck abhängig und beschreibt den momentanen Zustand der Troposphäre. Sie kann nach u. a. HOFMANN-WELLENHOF *et al.* (1997) wie folgt berechnet werden:

$$N = K_1 \left(\frac{p_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \left[K_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_\omega^{-1} \right] \quad (3.6)$$

mit	T	Temperatur [K]
	$p_d = p - e$	Partialdruck der trockenen Luft [mbar]
	p	Luftdruck [mbar]
	e	Dampfdruck [mbar]
	K_1, K_2, K_3	Konstanten, tabelliert
	Z_d, Z_ω	Kompressionskoeffizienten der trockenen und der feuchten Luft.

Die Kompressionskoeffizienten Z_d und Z_w beschreiben die Abweichung des Verhaltens der Luft von dem des idealen Gases. Für die Konstanten K_1, K_2 und K_3 wurden Werte empirisch ermittelt (zum Beispiel von ESSEN und FROOME (1951), SMITH und WEINTRAUB (1953) und THAYER (1974)). Sie liegen in tabellarischer Form vor.

Die troposphärische Laufzeitverzögerung wird zu etwa 90% vom hydrostatischen Anteil der Troposphäre verursacht. Dieser ist nur abhängig von der Temperatur und dem Partialdruck der trockenen Luft. Der feuchte Anteil dagegen ist abhängig von Temperatur und Dampfdruck und variiert im Vergleich zum trockenen Anteil zeitlich sehr stark. Gleichung 3.6 lässt sich durch Aufspaltung in hydrostatischen und feuchten Anteil wie folgt darstellen (SAASTAMOINEN 1972, DAVIS *et al.* 1985):

$$N = N_d + N_w \quad (3.7)$$

mit

$$N_d = K_1 \left(\frac{p_d}{T} \right) Z_d^{-1} \quad (3.8)$$

$$N_w = \left[K_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1} \right]. \quad (3.9)$$

Für die Bestimmung der troposphärischen Korrektur ist das Integral über N entlang des Signalwegs zu berechnen. Dafür sind meteorologische Daten über den gesamten Integrationsbereich erforderlich, die jedoch für die Mehrzahl der Stationen nicht mit der erforderlichen Genauigkeit vorliegen. Zwar werden auf einigen Stationen Wasserdampfradiometer betrieben oder Radiosondenmessungen durchgeführt, aber diese Beobachtungen decken meist nicht den gesamten VLBI- oder GPS-Beobachtungszeitraum ab oder weisen nicht die notwendige Genauigkeit auf.

Daher muss für die Berücksichtigung der troposphärischen Laufzeitverzögerung auf Modellannahmen zurückgegriffen werden. Da der hydrostatische Anteil zeitlich nicht sehr stark variiert, lässt er sich recht gut durch ein Modell erfassen. Die Modellierung des feuchten Anteils ist dagegen wegen der hohen zeitlichen Variabilität sehr schwierig (NOTHNAGEL 2000). Er wird daher bei der geodätischen Auswertung von VLBI- und GPS-Beobachtungen als Unbekannte geschätzt.

Die Umrechnung der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung auf die tatsächliche Elevationsrichtung der Beobachtung erfolgt mit Hilfe einer Übertragungsfunktion (engl: *mapping function*). Auch hier wird zwischen einer Übertragungsfunktion für den hydrostatischen und einer für den feuchten Anteil der Laufzeitverzögerung unterschieden. Die troposphärische Korrektur in Beobachtungsrichtung wird aus der Zenitkorrektur wie folgt berechnet (zum Beispiel DAVIS *et al.* (1985)):

$$\Delta\varrho_T(\epsilon) = \Delta\varrho_h \cdot m_h(\epsilon) + \Delta\varrho_w \cdot m_w(\epsilon) \quad (3.10)$$

- mit $\Delta\varrho_h$ hydrostatischer Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung
 $\Delta\varrho_w$ feuchter Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung
 $m_h(\epsilon)$ Übertragungsfunktion des hydrostatischen Anteils für eine Beobachtung unter dem Elevationswinkel ϵ
 $m_w(\epsilon)$ Übertragungsfunktion des feuchten Anteils für eine Beobachtung unter dem Elevationswinkel ϵ .

Die Übertragungsfunktionen für beide Anteile gehen von einer kugelsymmetrischen Troposphäre aus und haben die folgende ursprünglich von MARINI (1972) entwickelte und von HERRING (1992) erweiterte Form:

$$m(\epsilon) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a}{b}}}{\frac{1}{1 + c}} \cdot \frac{1}{\sin(\epsilon) + \frac{a}{\sin(\epsilon) + \frac{b}{\sin(\epsilon) + c}}} \quad (3.11)$$

Dabei sind a , b und c die tabellierten Koeffizienten der Übertragungsfunktionen.

Vielfach werden für VLBI und GPS heute die Übertragungsfunktionen von NIELL (1996) (engl.: *Niell mapping function* (NMF)) verwendet. Die Koeffizienten der Übertragungsfunktionen werden für beide Anteile aus Atmosphärenprofilen berechnet, die auf Radiosondenaufstiegen basieren. Die Auflösung beträgt 15° bezüglich der geographischen Breite. Eine Längenabhängigkeit wird nicht berücksichtigt. Die zeitliche Auflösung ist 1 Tag. Ein Vorteil dieser Übertragungsfunktion ist, dass sie nur von der Stationshöhe und dem Tag im Jahr abhängig ist. Dafür besteht der Nachteil, dass für Nord- und Südhalbkugel von einem bis auf eine Phasenverschiebung von 180° gleichen saisonalen Verhalten der Troposphäre ausgegangen wird. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Polarregionen mit Breiten von mehr als 75° als einheitlich betrachtet und durch die bei 75° nördlicher Breite gemessenen Radiosondenprofile charakterisiert werden. Das gleiche trifft auf die Region zwischen 15° nördlicher und 15° südlicher Breite zu, für die das Profil, das auf 15° nördlicher Breite gemessen wurde, als gültig angenommen wird.

Neben den auf Radiosondendaten basierenden Übertragungsfunktionen entwickelte NIELL (2000) einen weiteren verbesserten Ansatz. Dabei wird für die Ableitung der Koeffizienten der hydrostatischen Übertragungsfunktion die aus numerischen Wettermodellen abgeleitete geopotentielle Höhe der 200 hPa Isobaren als meteorologischer Eingangsparameter verwendet. Dadurch kann der tatsächliche Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt besser erfasst und berücksichtigt werden. Diese Übertragungsfunktion wird auch kurz als IMF (engl.: *improved mapping function*) bezeichnet. Ein Vergleich der unter Verwendung der Übertragungsfunktionen NMF und IMF berechneten Stationshöhen zeigt für einige Stationen in Polarregionen Unterschiede von mehr als 10 mm (STEIGENBERGER *et al.* 2006(a)). Für mittlere Breiten liegen die Differenzen aber nur im Bereich weniger Millimeter.

Ebenfalls eine Verbesserung der Koeffizienten der Übertragungsfunktionen erreichten BÖHM und SCHUH (2004). Die in dieser Publikation vorgestellte hydrostatische Übertragungsfunktion mit dem englischen Namen *Vienna mapping function* (VMF) basiert auf der sogenannten Strahlverfolgung (engl.: *ray tracing*) der Radiowellen in numerischen Wettermodellen, die eine Berechnung der troposphärischen Refraktion entlang des tatsächlichen Signalwegs ermöglicht. Ein Vergleich von IMF und VMF zeigt, dass beide Übertragungsfunktionen zu ähnlichen Ergebnissen in der Auswertung von VLBI-Beobachtungen führen (BÖHM und SCHUH 2004). Mit der Übertragungsfunktion VMF1 konnte die VMF weiter verbessert werden, indem insbesondere die Modellierung der Breitenabhängigkeit verfeinert wurde (BÖHM *et al.* 2006). Ein Vergleich der beiden Übertragungsfunktionen VMF und VMF1 zeigt Differenzen in den Stationshöhen von bis zu 4 mm für Stationen am Äquator und in den Polarregionen. Die Koeffizienten der Übertragungsfunktion VMF1 werden für alle VLBI- und viele der GPS-Stationen des IGS unter <http://www.hg.tuwien.ac.at> (22.12.2007) bereitgestellt.

Wie bereits erwähnt, kann der hydrostatische Anteil der Laufzeitverzögerung mit Hilfe von Modellen beschrieben werden. Dabei muss allerdings auf den integralen Luftdruck zurückgegriffen werden, da der Partialdruck der trockenen Luft nicht direkt messbar ist. Für die Modellierung des hydrostatischen Anteils kommen zwei Möglichkeiten in Betracht, die auf Luftdruckwerten der Stationen beziehungsweise auf der numerischen Integration der Luftdruckwerte aus Wettermodellen basieren. Luftdruckwerte der Stationen sind entweder direkt aus Luftdruckmessungen verfügbar oder können aus Standardmodellen, wie dem Modell von BERG (1984), berechnet werden, welches den Luftdruck p in Abhängigkeit von der Stationshöhe h modelliert:

$$p = 1013.25 \cdot (1 - 0.0000226 \cdot h)^{5.225}. \quad (3.12)$$

Die hydrostatische Laufzeitverzögerung kann dann aus dem Luftdruck mit der von SAASTAMOINEN (1973) entwickelten und von DAVIS *et al.* (1985) verfeinerten Formel berechnet werden. Für eine Luftfeuchte von 0% ergibt sich für die Berechnung der hydrostatischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:

$$\Delta\varrho_T = 0.0022768 \cdot \frac{p}{(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\phi) - 0.28 \cdot 10^{-6} \cdot h)}. \quad (3.13)$$

Die hydrostatische Laufzeitverzögerung ist damit nur von der Breite ϕ , der ellipsoidischen Höhe h der Station und dem Luftdruck abhängig. Aus numerischen Wettermodellen berechnete hydrostatische Laufzeitverzögerungen werden für VLBI und GPS-Stationen unter <http://www.hg.tuwien.ac.at> (21.11.2007) bereitgestellt (BÖHM *et al.* 2006).

Während die hydrostatische Laufzeitverzögerung, die aus Luftdruckmessungen oder aus numerischen Wettermodellen abgeleitet wird, zeitlich variabel ist, sind die Werte aus dem Standardmodell zeitunabhängig. Das bedeutet, dass ein vom Standardmodell nicht modellierter hydrostatischer Anteil der Laufzeitverzögerung gemeinsam mit dem feuchten Anteil geschätzt werden muss. Da die beiden geschätzten Anteile nicht trennbar sind, wird auf beide die Übertragungsfunktion für den feuchten Anteil angewandt. Das kann zu Fehlern in der Laufzeitverzögerung und damit zu Fehlern in den Stationshöhen von wenigen Millimetern führen (zum Beispiel TESMER *et al.* (2006) und TREGONING und HERRING (2006)).

Ein Aspekt, der bisher nicht betrachtet wurde, ist die Abhängigkeit der troposphärischen Laufzeitverzögerung vom Azimut der Beobachtungen. Die Übertragungsfunktionen sind nur Funktionen des Elevationswinkels der Beobachtung und gehen damit von einer kugelsymmetrischen Atmosphäre aus. Diese Symmetrie ist jedoch in den meisten Fällen nicht gegeben. Durch die Nichtberücksichtigung der Asymmetrie kann es zu Fehlern in der Laufzeitverzögerung von bis zu 3 cm für eine Beobachtung unter 10° Elevation kommen (CHEN und HERRING 1997, BAR-SEVER und KROGER 1998). Systematische Gradienten treten vor allem in Nord-Süd-Richtung für Stationen mittlerer Breiten auf, da die Höhe der Troposphäre vom Äquator zu den Polen hin abnimmt. Gradienten in Ost-West-Richtung haben einen überwiegend stochastischen Charakter und werden mehrheitlich durch Wettervorgänge verursacht. Dennoch kommt es auch in Ost-West-Richtung zur Ausbildung systematischer Gradienten beispielsweise für Stationen in Küstenregionen oder an Wetterscheiden (Gebirge und Binnenseen).

Da zur Berechnung der Näherungswerte der Gradienten eine genaue Kenntnis des momentanen Zustands der Troposphäre notwendig ist (BÖHM und SCHUH 2007), werden diese bisher nicht standardmäßig in die Auswertung eingeführt, sondern der gesamte Wert des Gradienten wird als Parameter in der Ausgleichung geschätzt. Unter Berücksichtigung der Gradienten ergibt sich die troposphärische Laufzeitverzögerung (3.10) zu (MCCARTHY und PETIT 2004):

$$\Delta\varrho_T = \Delta\varrho_h \cdot m_h(\epsilon) + \Delta\varrho_w \cdot m_w(\epsilon) + m_g(\epsilon)[G_N \cos a + G_E \sin a] \quad (3.14)$$

mit m_g Übertragungsfunktion für den durch die Gradienten berücksichtigten Anteil der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung
 G_N Gradient in Nord-Süd-Richtung
 G_E Gradient in Ost-West-Richtung
 a Azimut der Beobachtung

Für $m_g(\epsilon)$ werden von MCCARTHY und PETIT (2004) verschiedene Möglichkeiten angegeben, zum Beispiel:

$$m_g(\epsilon) = m_h(\epsilon) \cot \epsilon \quad \text{oder} \quad (3.15)$$

$$m_g(\epsilon) = m_w(\epsilon) \cot \epsilon \quad (\text{DAVIS } et al. 1993, \text{MACMILLAN } 1995) \quad (3.16)$$

$$m_g(\epsilon) = 1/(\sin \epsilon \tan \epsilon + 0.0032) \quad (\text{CHEN und HERRING } 1997). \quad (3.17)$$

Die Übertragungsfunktionen stimmen für eine Beobachtung unter 10° Elevation zu 90% überein, für eine Beobachtungen mit einer Elevation von 5° erreichen die Differenzen etwa 50%.

b) Ionosphärische Laufzeitverzögerung

Die ionosphärische Laufzeitverzögerung beschreibt den Einfluss der nicht-neutralen Atmosphäre auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Mikrowellen. Proportional zur Strahlungsintensität der Sonne entstehen in diesem Teil der Atmosphäre (Ionosphäre) freie Ionen und Elektronen infolge photo-chemischer Prozesse. Die Strahlungsintensität ist abhängig vom Stand der Sonne und der Sonnenaktivität.

Die Sonnenaktivität unterliegt einem etwa elfjährigen Zyklus. In Zeiten hoher Sonnenaktivität steigt die Anzahl der freien Elektronen auf ein Vielfaches des durchschnittlichen Wertes. Zum einen werden durch die erhöhte ultraviolette Strahlung mehr Atome ionisiert, zum andern dringen vermehrt geladene Teilchen, die Bestandteil der Sonnenstrahlung sind, an den Polen in die Erdatmosphäre ein. Sie verursachen Änderungen im Magnetfeld, wodurch wiederum starke elektrische Felder induziert werden. Jene ermöglichen ein Vordringen der geladenen Teilchen bis in mittlere Breiten. Diese Vorgänge werden auch als magnetische Stürme bezeichnet (KLOBUCHAR 1996).

Für Mikrowellen ist die Ionosphäre ein dispersives Medium. Das heisst, ihr Einfluss auf die Ausbreitung eines Signals ist frequenzabhängig. Werden die Terme höherer Ordnung vernachlässigt, ergibt sich die ionosphärische Laufzeitverzögerung aus:

$$\Delta\varrho_I = -40.3 \frac{TEC}{f^2} \quad (3.18)$$

wobei TEC (engl.: *total electron content*) die Anzahl der freien Elektronen in einem Kreiszyylinder entlang des Signalwegs mit einer Grundfläche von 1 m^2 angibt.

Sowohl bei der VLBI als auch bei GPS werden Phasenmessungen auf mindestens zwei unterschiedlichen Frequenzen f_1 und f_2 durchgeführt. Die geodätische VLBI verwendet Beobachtungen aus dem X- und aus dem S-Band. Während die Beobachtungen des X-Bandes die eigentlichen Beobachtungen der geodätischen VLBI darstellen, werden die Beobachtungen des S-Bandes für die Berechnung einer ionosphärischen Korrektur benötigt. Sie wird durch Linearkombination der beiden Frequenzbänder bestimmt und nach LOHMAR (1985) für die mit dem X-Band beobachtete Zeitdifferenz τ_x wie folgt angegeben:

$$\Delta\tau_x = (\tau_x - \tau_s) \frac{f_s^2}{f_x^2 - f_s^2} \quad (3.19)$$

mit $\Delta\tau_x$ ionosphärische Korrektur der im X-Band beobachteten Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung
 τ_x im X-Band beobachteter Laufzeitunterschied
 τ_s im S-Band beobachteter Laufzeitunterschied
 f_x mittlere Frequenz des X-Bandes
 f_s mittlere Frequenz des S-Bandes.

Unter der Annahme, dass die Beobachtungen auf beiden Frequenzbändern unabhängig voneinander sind, ergibt sich für die Genauigkeit der ionosphärischen Korrektur:

$$\sigma_{\Delta\tau_x} = \sqrt{\sigma_{\tau_x}^2 + \sigma_{\tau_s}^2} \frac{f_s^2}{f_x^2 - f_s^2}. \quad (3.20)$$

Mit eher pessimistischen Genauigkeitsannahmen für die Beobachtungen auf beiden Bändern kann die Genauigkeit der ionosphärischen Korrektur mit etwa 2 mm angegeben werden (PETROV 1998).

Problematisch sind vor allem kleinräumige und kurzzeitige Störungen in der Ionosphäre (WANNINGER 1994). Sie treten insbesondere in der Äquatorregion und an den Polen während magnetischer Stürme auf. Sie bewirken, dass die Signalwege der beiden Frequenzen um bis zu zehn Meter voneinander entfernt verlaufen können, und damit die Annahme über gleiche Ausbreitungsbedingungen für beide Signale, wie sie zur Berechnung der Linearkombination getroffen wird, nicht mehr gegeben ist.

3.1.2.2 Instrumentelle Fehler

a) Antennendeformation

Antennendeformationen treten infolge thermischer Variationen auf und können Änderungen der Laufzeitdifferenz τ von einigen Picosekunden bewirken. Neben der Temperaturänderung ist die Deformation abhängig von der Größe, dem Baumaterial und der Umgebung des Teleskops. Die vertikale Lage des Referenzpunkts kann so um bis zu 15 mm durch jahreszeitliche Effekte und um 5 mm während eines Tages variieren (HAAS 1996). Für Effelsberg, eines der größten Teleskope der geodätischen VLBI, ergibt sich bei einer Elevation von 5° und einer Temperaturänderung von 10 K eine Änderung der Zeitdifferenz von 15 ps, was einer Streckenlänge von etwa 5 mm entspricht. Die in den Konventionen des IERS (MCCARTHY und PETIT 2004) vorgeschlagene Korrektur entspricht dem in HAAS (1996) beschriebenen Modell, das die meisten Bauarten heutiger Teleskope erfasst. Es ermöglicht die Modellierung des Laufzeitunterschiedes in Abhängigkeit von der Bauart des Teleskops und der Elevation, unter der eine Beobachtung durchgeführt wurde. Empfehlenswert wäre, dass in allen Radioteleskopen parallel zu den Beobachtungen und meteorologischen Messungen auch Temperaturmessungen im

Bauwerk selbst vorgenommen und die Deformationen der Antenne (zum Beispiel mit Hilfe von Invardrähten) gemessen werden. Das ist für die Teleskope in Wettzell und Onsala bereits der Fall. Auf diese Weise wird die Erstellung eines individuellen Deformationsmodells für jedes Teleskop möglich. Die Messung der Bauwerkstemperatur ist notwendig, da das Teleskop verzögert auf Änderungen der Umgebungstemperatur reagiert. Alternativ entwickelten WRESNIK *et al.* (2007) ein Modell, das die Änderung der Bauwerkstemperatur in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur beschreibt.

Neben der thermischen Deformation durch Variationen der Umgebungstemperatur unterliegen die Teleskope Verformungen wegen Sonneneinstrahlung und einer gravitativen Deformation. Letztere ist eine Durchbiegung des Teleskops aufgrund seines Eigengewichtes, die abhängig von der Orientierung des Instruments ist. DAWSON *et al.* (2005) zeigen für das Teleskop in Hobart, Australien, dass der daraus resultierende Laufzeitunterschied bis zu 2 mm betragen kann.

b) Uhrenverhalten

Die eigentliche Beobachtungsgröße der VLBI ist der Laufzeitunterschied τ . Die Verwendung hochgenauer Uhren und eine präzise Zeitsynchronisation zwischen den einzelnen Stationen sind somit Voraussetzung für millimetergenaue VLBI-Beobachtungen.

Die VLBI-Frequenznormale weisen eine sehr hohe Kurzzeitstabilität auf. Dadurch kann eine hohe Genauigkeit der einzelnen VLBI-Beobachtung gewährleistet werden. Die Langzeitstabilität der Frequenznormale ist jedoch gering. Um die VLBI-Beobachtungen in Bezug zur Koordinierten Weltzeit UTC zu erhalten, erfolgt eine Synchronisation der VLBI-Frequenznormale mit Hilfe von GPS-Frequenznormalen. Wegen ihres direkten Bezugs zu UTC werden die Frequenznormale auch als Uhren bezeichnet. Die Synchronisation mit den GPS-Frequenznormalen erfolgt mit einer Genauigkeit von etwa $1 \mu\text{s}$. Für den Bezug zu UTC ist diese Genauigkeit ausreichend, nicht jedoch für die Synchronisation der VLBI-Uhren untereinander (SOVERS *et al.* 1998). Im Korrelationsprozess werden deshalb zusätzlich relative Uhrenkorrekturen geschätzt.

Unregelmäßigkeiten im Uhrenverhalten, die beispielsweise während einer VLBI-Session auftreten, müssen in der Auswertung berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck werden Parameter einer quadratischen Funktion in der Auswertung geschätzt, mit deren Hilfe das Uhrenverhalten während einer Session relativ zu einer als Referenz gewählten Uhr approximiert wird (TITOV *et al.* 2001). Sprünge im Uhrenverhalten werden durch Ansetzen einer neuen quadratischen Funktion berücksichtigt. Üblicherweise wird bei der Auswertung einer VLBI-Session die Uhr eines der Teleskope als Referenzuhr gewählt. Für diese kann das Uhrenverhalten nicht parametrisiert werden, da das Normalgleichungssystem sonst singular wird und der Bezug der VLBI-Beobachtung zu UTC verloren ginge.

Neben dem Verhalten der Uhr werden durch die Parameter der quadratischen Funktion auch andere instrumentelle Effekte mit einem ähnlichem Verhalten absorbiert (SOVERS *et al.* 1998).

c) Instrumentelle Laufzeitverzögerung

Die instrumentelle Laufzeitverzögerung ist die Zeitspanne, die das beobachtete Signal für das Durchlaufen des Datenerfassungssystems benötigt. Sie ist frequenzabhängig und kann durch Kalibration sehr genau erfasst werden. Dabei wird ein Referenzsignal bekannter Phase und Amplitude generiert, welches gemeinsam mit den tatsächlichen Beobachtungen den Signalweg im Instrument durchläuft. Durch Rekonstruktion des Referenzsignals kann die instrumentelle Laufzeitverzögerung bestimmt werden (SOVERS *et al.* 1998). Eine konstante Laufzeitverzögerung oder ein langanhaltender Trend könnten auch durch die geschätzten Uhrparameter mit berücksichtigt werden. Daneben treten jedoch auch kurzzeitige Variationen in der Laufzeitverzögerung auf - zum Beispiel verursacht durch Temperaturschwankungen - die eine Kalibration notwendig machen.

3.1.2.3 Relativistische Effekte

Die in Gleichung 3.3 angegebene relativistische Korrektur berücksichtigt den allgemein-relativistischen Effekt auf die Signalausbreitung (SOFFEL *et al.* 1984), der durch die Raumkrümmung großer Massen verursacht wird, sowie den speziell-relativistischen Effekt durch die Relativbewegung der beiden Endpunkte einer Basislinie infolge der Rotation der Erde und die Bewegung der Erde um die Sonne. Hinzu kommt neben kleineren Korrekturen die Transformation der in baryzentrischer Koordinatenzeit ausgedrückten Laufzeitdifferenz τ auf die Eigenzeit einer Atomuhr, da die beobachtete Laufzeitverzögerung gleich der Differenz der Eigenzeiten der beiden Atomuhren der Stationen einer Basislinie ist. Die Eigenzeit der Atomuhr ist dabei abhängig vom Gravitationspotential am Ort der Uhr und von der Geschwindigkeit der Uhr relativ zum ruhenden baryzentrischen System. Die Modelle zur Berücksichtigung aller relativistischen Effekte sind in den Konventionen des IERS (MCCARTHY und PETIT 2004) beschrieben.

3.2 Globales Positionierungssystem - GPS

3.2.1 Beobachtungsgleichung des GPS-Verfahrens

Das NAVSTAR-GPS¹, im Folgenden kurz als GPS bezeichnet, ist ein globales präzises Einweg-Navigationssystem und das jüngste der in dieser Arbeit betrachteten Raumbeobachtungsverfahren. Erst im Dezember 1998 wurde die volle Ausbaustufe erreicht. Die Entwicklung des Systems hat in der jüngeren Vergangenheit zu einer enormen Genauigkeitssteigerung der Beobachtungen geführt, so dass es für viele präzise geodätische Anwendungen an Bedeutung gewann. Im Vergleich zu den Raumbeobachtungsverfahren SLR und VLBI ist GPS ein sehr kostengünstiges Verfahren. Aus diesem Umstand resultiert auch die im Vergleich sehr gute globale Verteilung permanent beobachtender Stationen. Für die Realisierung terrestrischer Referenzsysteme ist GPS insbesondere wegen der genannten hohen Stationsdichte, der großen Anzahl an Ko-lokationen zu den übrigen Raumbeobachtungsverfahren und wegen seiner hohen Kurzzeitstabilität von Bedeutung.

Das GPS arbeitet mit Mikrowellensignalen L_1 und L_2 der Frequenzen $f_1 = 1.57 \text{ GHz}$ und $f_2 = 1.23 \text{ GHz}$. Diese Frequenzen dienen als Trägerfrequenzen der Code-Information. Der Code setzt sich zusammen aus dem Navigationscode und weiteren Nutzerinformationen wie Ephemeriden, Uhrkorrekturen und Informationen über den Zustand des Satelliten (LEICK 1995).

Die Messung der Phasen der Trägerfrequenzen ermöglicht eine sehr viel genauere Bestimmung geodätischer Parameter als die Code-Messungen, weswegen im Folgenden nur noch die Trägerphasenmessungen betrachtet werden. Die Trägerphasenmessung beruht auf dem Vergleich der Phasen des vom Satelliten ausgesandten und des empfangenen Signals sowie der Bestimmung der Anzahl voller Wellenzüge zwischen Satellit und Empfänger (Mehrdeutigkeiten, engl.: *ambiguities*). Die fundamentale Beobachtungsgleichung hat die folgende Form (HUGENTOBLER *et al.* 2005):

$$\phi_i^k(t) = \phi_i(t) - \phi^k(t - \tau_i^k) + N_i^k + e_i^k \quad (3.21)$$

mit	$\phi_i(t)$	Phasenlage des Signals zum Zeitpunkt t des Empfangs durch den Empfänger i
	$\phi^k(t - \tau_i^k)$	Phasenlage des Signals zum Zeitpunkt des Aussendens des Signals vom Satelliten k
	N_i^k	Anzahl ganzer Wellenzüge zwischen Satellit und Empfänger
	e_i^k	Fehlerterm, der Messfehler der Beobachtung sowie nicht ausreichend modellierte Fehlereinflüsse enthält.

Für die Phasenlage des Signals am Satelliten gilt:

$$\phi^k(t - \tau) = \phi^k(t) - f(\tau_i^k) \quad (3.22)$$

wobei f gleich der Frequenz des Signals ist. Die Beobachtungsgleichung ergibt sich damit unter Berücksichtigung des Empfänger- und Satellitenuhrfehlers zu:

$$\phi_i^k(t) = \phi_i(t) - \phi^k(t) + f(\tau_i^k + dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)) + N_i^k + e_i^k \quad (3.23)$$

wobei	$dt_i(t)$	Uhrfehler des Empfängers zum Empfangszeitpunkt
	$dt^k(t - \tau_i^k)$	Uhrfehler des Satelliten zum Aussendezeitpunkt.

Durch Multiplikation mit der Wellenlänge des Signals, wird die Beobachtungsgleichung in metrischen Einheiten erhalten. Unter Berücksichtigung weiterer Fehlereinflüsse ergibt sich für die Beobachtung eines Satelliten k auf einer Station i die folgende ausführliche Gleichung:

¹Navigation System with Time and Ranging - Global Positioning System

$$\begin{aligned} \Phi_i^k(t) = & \varrho(t, t - \tau_i^k) - \delta\varrho_{I_i^k} + \delta\varrho_{T_i^k} + \delta\varrho_{m,i} + c_0(\delta t^k + \delta t_i) + c_0(dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)) + \\ & \delta\varrho_{p_i}(t) + \delta\varrho_{p^k}(t) + \delta\varrho_{r_i^k} + \lambda(\phi_i(t) - \phi^k(t)) + \lambda N_i^k + e_i^k \end{aligned} \quad (3.24)$$

mit	$\varrho(t, t - \tau_i^k)$	geometrische Entfernung zwischen den Phasenzentren von Satellit und Empfangsantenne
	$\delta\varrho_{I_i^k}$	ionosphärische Laufzeitverzögerung
	$\delta\varrho_{T_i^k}$	troposphärische Laufzeitverzögerung
	$\delta\varrho_{m,i}$	Mehrwegeausbreitung
	$\delta t^k, \delta t_i$	instrumentelle Laufzeitverzögerung im Aussende- und Empfangssystem
	$\delta\varrho_{p_i}(t)$	Abweichung und Variation des physikalischen Antennenphasenzentrums der Empfangsantenne gegenüber den Beobachtungspunkt
	$\delta\varrho_{p^k}(t)$	Abweichung und Variation des physikalischen Antennenphasenzentrums der Satellitenantenne gegenüber dem Schwerpunkt des Satelliten
	$\delta\varrho_{r_i^k}$	relativistische Korrektur
	c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Werden beide vom Satelliten ausgestrahlten Signale L_1 und L_2 empfangen, so können daraus Linearkombinationen gebildet werden. Diese besitzen spezielle Eigenschaften, die für verschiedene Anwendungen von Nutzen sind. So hat die Linearkombination L_3 den Vorteil, dass der Einfluss der ionosphärischen Laufzeitverzögerung erster Ordnung vernachlässigbar klein wird (vergl. Kapitel 3.1.2.1). Die L_3 -Linearkombination wird daher, trotz ihres im Vergleich zu L_1 etwa dreifach höheren Messrauschens, als Beobachtung für die Auswertungen von Netzen mit Ausdehnungen über 20 km verwendet (ROTHACHER und SCHAEER 1994). Die Berechnung der ionosphärenfreien Linearkombination aus den ursprünglichen Phasemessungen $L_1\Phi_i^k(t)$ und $L_2\Phi_i^k(t)$ erfolgt in Metern mit:

$$L_3\Phi_i^k(t) = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2}(f_1^2 L_1\Phi_i^k(t) - f_2^2 L_2\Phi_i^k(t)). \quad (3.25)$$

Die Phasemessung der Linearkombination L_5 wird erhalten aus:

$$L_5\Phi_i^k(t) = \frac{1}{f_1 - f_2}(f_1^{L_1}\Phi_i^k(t) - f_2^{L_2}\Phi_i^k(t)) \quad (3.26)$$

und findet Anwendung bei der Detektion von Phasensprüngen (engl.: *cycle slips*) und bei der Lösung der Mehrdeutigkeiten (DACH *et al.* 2007). Eine ausführliche Beschreibung der Linearkombination geben u.a. HOFMANN-WELLENHOF *et al.* (1997).

Für einige der in Gleichung 3.24 aufgeführten Fehlereinflüsse gilt, dass sie zeitgleiche Beobachtungen zweier Empfänger zu einem Satelliten oder eines Empfängers zu zwei Satelliten völlig oder nahezu identisch beeinflussen. Durch Differenzbildung zwischen den Beobachtungen können daher die Fehlereinflüsse eliminiert oder zumindest erheblich reduziert werden. Die für die Berechnungen zu dieser Arbeit verwendete Bernese GPS Software in der Version 5.0 (DACH *et al.* 2007) basiert auf sogenannten doppelten Differenzen. Dabei werden zunächst Differenzen zwischen den Beobachtungen zweier Stationen zu einem Satelliten berechnet, um satellitenspezifische Fehler, wie beispielsweise den Satellitenuhrfehler, zu reduzieren. Anschließend erfolgt die Differenzbildung zwischen den Beobachtungen einer Station zu zwei Satelliten zur Reduktion der stationspezifischen Fehlereinflüsse.

3.2.2 Fehlereinflüsse auf GPS-Beobachtungen

3.2.2.1 Atmosphärische Einflüsse

a) Troposphärische Laufzeitverzögerung

Das GPS-Beobachtungsverfahren basiert wie die VLBI auf der Beobachtung von Mikrowellensignalen. Die Korrektur der troposphärischen Laufzeitverzögerung erfolgt für beide Verfahren auf die gleiche Weise. Eine ausführliche Beschreibung der troposphärischen Laufzeitverzögerung sowie deren Berücksichtigung wurde in Kapitel 3.1.2.1 gegeben.

b) Ionosphärische Laufzeitverzögerung

Da GPS ebenso wie VLBI Signale unterschiedlicher Frequenzen im Mikrowellenbereich beobachtet, kann auch die Berücksichtigung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung für beide Verfahren in gleicher Weise erfolgen. Sie wurde im Kapitel 3.1.2.1 ausführlich beschrieben.

Die sogenannte ionosphärenfreie Linearkombination L_3 , die aus den Signalen L_1 und L_2 berechnet wird, hat eine Wellenlänge von nur 0.6 cm, die unterhalb des Messrauschens liegt. Eine Lösung der Mehrdeutigkeiten ist daher mit L_3 nicht möglich und muss unter Verwendung von Linearkombinationen größerer Wellenlänge erfolgen (WANNINGER 1994). Zur Berücksichtigung der ionosphärischen Refraktion wird dabei ein Ionosphärenmodell eingeführt. Es kann jedoch nur der ungestörte Teil der Ionosphäre im Modell erfasst werden (WANNINGER 2000). Der Anteil der ionosphärischen Refraktion, der durch Störungen verursacht wird, geht dagegen als Unbekannte in die Auswertung ein. In der Praxis werden in der Regel zwei Parameterschätzungen durchgeführt. In einer ersten werden die Mehrdeutigkeiten gelöst. In einer zweiten erfolgt die Schätzung aller übrigen Parameter unter Verwendung der L_3 Linearkombination.

Bei der Berücksichtigung ionosphärischer Laufzeitverzögerung durch Bildung der Linearkombination L_3 werden Terme dritter und höherer Ordnung vernachlässigt. Damit können Abweichungen in den abgeleiteten Stationspositionen von mehreren Millimetern auftreten. Bisher kann die Berücksichtigung der Effekte zweiter und dritter Ordnung nur mit Hilfe von Ionosphärenmodellen erfolgen (BASSIRI und HAJJ 1993, FRITSCHKE *et al.* 2005). Wenn zukünftig für das modernisierte GPS-System und Galileo jeweils drei Frequenzen zur Verfügung stehen, kann der Term zweiter Ordnung ebenfalls durch Linearkombination eliminiert werden (WANG *et al.* 2005).

3.2.2.2 Mehrwegeausbreitung

Als Mehrwegeausbreitung wird der Effekt bezeichnet, dass neben den direkt empfangenen Satellitensignalen auch reflektierte Signale zum Phasenzentrum der Antenne gelangen. Insbesondere glatte Flächen in der unmittelbaren Umgebung der Antenne führen zu starken Mehrwegeeffekten.

Gelangen reflektierte Signale zum Phasenzentrum der Antenne, so überlagern sie sich dort mit den direkten Signalen und sind von diesen nicht mehr trennbar. Das so entstehende Signal ist gegenüber dem ursprünglichen phasenverschoben. Die Größe der Phasenverschiebung ist abhängig von der Signalstärke von direktem und reflektiertem Signal und von der Wellenlänge. Eine maximale Verschiebung wird bei vollständiger Reflexion und einer Phasendifferenz von $\Delta\phi = \pi$ zwischen direktem und reflektiertem Signal erhalten. Sie beträgt dann ein Viertel der Wellenlänge. Für die Frequenzen f_1 und f_2 erreichen die maximalen Fehler durch Mehrwegeausbreitung damit ± 4.76 cm und ± 6.11 cm (LANGLEY 1996).

Ein weiterer Effekt der Mehrwegeausbreitung ist die Änderung der Signalstärke (Fluktuation) infolge der Überlagerung und daraus resultierend die Veränderung des Signal-Rausch-Verhältnisses.

Um den Einfluss der Mehrwegeausbreitung zu reduzieren, wurden unterschiedliche Antennentypen entwickelt, die insbesondere vom Boden reflektierte Signale nicht empfangen. Weiterhin sind, bedingt durch die Verteilung der Reflektionsflächen in der Umgebung der Antenne, die Elevationswinkel der reflektierten Signale häufig sehr klein. Demzufolge kann bereits durch die Wahl der Höhenwinkelmaske der Einfluss von Mehrwegeeffekten wirksam verringert werden. Allerdings wird dabei auch die Anzahl der Beobachtungen, die zur Auswertung zur Verfügung stehen, reduziert. Das Fehlen von Beobachtungen niedriger Elevation beeinträchtigt insbesondere die Bestimmung der Höhenkomponente.

Mehrwegeeffekte sind stark von der Satellitenkonstellation abhängig. Bei langen Beobachtungszeiten mittelt sich der Effekt größtenteils heraus. Ein systematischer Restfehler bleibt jedoch durch die ungleichmäßige Verteilung von Reflexionsflächen über den Horizont bestehen. Dieser Fehler beeinträchtigt insbesondere die Genauigkeit der Horizontalkomponenten einer Stationsposition.

3.2.2.3 Variationen des Antennenphasenzentrums

Die Beobachtungsgleichung 3.24 beschreibt die Entfernung zwischen den Phasenzentren der Sende- und Empfangsantenne. Das jeweilige Phasenzentrum (also der physikalische Referenzpunkt) fällt üblicherweise nicht mit dem geometrischen Referenzpunkt der Antenne zusammen. Die Differenz zwischen physikalischem und geometrischem Referenzpunkt setzt sich aus einem konstanten und einem variablen Anteil zusammen. Für die Empfangsantennen ist der konstante Anteil abhängig von der gewählten Höhenwinkelmaske und der geographischen Breite der Station (BEUTLER *et al.* 1996). Der variable Anteil hängt von Elevation und Azimut des eintreffenden Signals ab. Die Lage des Phasenzentrums ist zudem für die Frequenzen f_1 und f_2 verschieden.

Die Lage des Phasenzentrums für f_1 und f_2 muss in Abhängigkeit von Elevation und Azimut durch Kalibration bestimmt werden. Lange Zeit wurden die Kalibrationswerte der Empfangsantennen relativ zu einer Referenzantenne (relative Phasenzentrumskorrekturen) angegeben, wobei davon ausgegangen wurde, die Variationen des Phasenzentrums dieser Antenne des Typs *Dorne Margolin T* seien Null. Jedoch zeigte sich, dass auch das Phasenzentrum dieses Antennentyps Variationen unterliegt. In der jüngeren Vergangenheit wurden daher auch absolute Antennenkalibrationen durchgeführt (MADER 1999, WÜBBENA *et al.* 2003). Wegen des überwiegend radialen (Höhen-)Effekts führte die Verwendung absoluter Phasenzentrumskorrekturen zunächst zu einer Änderung der Skalierung des globalen IGS-Netzes relativ zum ITRF2000 von etwa 15 ppb. Dieses Problem konnte durch das Anbringen geschätzter Satellitenantennenkorrekturen behoben werden (SCHMID und ROTHACHER 2003). Die Verwendung absoluter anstelle relativer Phasenzentrumskorrekturen bewirkt Änderungen in den Stationshöhen von bis zu 18 mm und in den Lagekomponenten von bis zu 8 mm (SCHMID *et al.* 2007). Damit ist eine Skalierungsänderung des globalen IGS-Netzes von etwa 1 ppb verbunden (STEIGENBERGER *et al.* 2008, SCHMID *et al.* 2005). Die gemeinsam mit den Stationshöhen geschätzten troposphärischen Laufzeitverzögerungen erfahren Änderungen von bis zu 3 cm (KRÜGEL *et al.* 2004, THALLER *et al.* 2005).

Radome, die zum Schutz auf den GPS-Antennen angebracht werden, haben einen zusätzlichen Einfluss auf die Lage und die Variation des Phasenzentrums. Deshalb werden die Absolutkalibrationen auch für verschiedene Antennen/Radom-Kombinationen durchgeführt. Die derzeit vom IGS offiziell verwendeten absoluten Phasenzentrumskorrekturen werden unter <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/igs05.atx> (25.11.2007) zur Verfügung gestellt und laufend aktualisiert.

3.2.2.4 Uhrfehler

Da GPS ein Einwegverfahren ist (das Signal durchläuft den Weg zwischen Satellit und Empfänger nur einmal), wird die GPS-Beobachtung sowohl vom Fehler der Satelliten- als auch von dem der Empfängeruhr beeinflusst. Trotz der Verwendung hochgenauer Frequenznormale kommt es zu Abweichungen von der GPS-Zeit. Durch Differenzbildung der Beobachtungen zweier Stationen zu einem Satelliten kann aber der entsprechende Satellitenuhrfehler zu einem großen Teil eliminiert werden (HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 1997). Ein kleiner verbleibender Anteil ergibt sich durch Synchronisationsfehler der beiden Empfängeruhren. Abweichungen heutiger Empfängeruhren von der systeminternen GPS-Zeit sind jedoch kleiner als 1 Millisekunde. Damit liegt der nicht-eliminierbare Anteil innerhalb des Messrauschens.

Der Empfängeruhrfehler wird durch Differenzbildung zweier Beobachtungen einer Station zu zwei Satelliten eliminiert. Dennoch muss der Empfängeruhrfehler auf $0.3 \mu\text{s}$ bekannt sein, um die Position des Satelliten zur richtigen Epoche zu berechnen. Bei der Auswertung von GPS-Beobachtungen wird deshalb der Empfängeruhrfehler näherungsweise aus den Code-Beobachtungen geschätzt (zum Beispiel DACH *et al.* (2007)).

3.2.2.5 Relativistische Effekte

Entsprechend der speziellen Relativitätstheorie geht eine von einer als ruhend angenommenen Uhr aus betrachtete bewegte Uhr langsamer als die ruhende Uhr. Das bedeutet, dass auch Satellitenuhren in Bezug auf erdfeste Uhren langsamer gehen. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie hängt der Gang einer Uhr auch vom Ort im Gravitationsfeld ab. Satellitenuhren gehen auf Grund dieses Effekts schneller als Uhren an der Erdoberfläche. Die Summe beider Effekte wird bereits bei der Frequenzgenerierung im Satelliten berücksichtigt (XU 2003). Da jedoch für die Berechnung von einer kreisförmigen Satellitenbahn ausgegangen wird, muss eine zusätzliche Korrektur wegen der Exzentrizität der Bahn vorgenommen werden (ROTHACHER 2003).

Zudem muss eine weitere speziell-relativistische Korrektur, die sogenannte Sagnac-Korrektur, angebracht werden. Sie ergibt sich aufgrund der durch die Erdrotation bewirkten Bewegung einer Station während der Laufzeit des Satellitensignals (ASHBY und SPILKER 1996). Diese Korrektur ist abhängig von der Breite der Station und von der Beobachtungsrichtung und kann bis zu 30 m betragen.

Eine dritte allgemein-relativistische Korrektur wird aufgrund der Beschleunigung des Satelliten im Erdschwerefeld notwendig. Eine Formel zur Berechnung dieses Effekts wird in MCCARTHY und PETIT 2004 angegeben.

Eine vierte Korrektur berücksichtigt allgemein-relativistische Effekte auf das sich im Gravitationsfeld der Erde ausbreitende Signal. Sie erreicht maximal einen Wert von etwa 2 cm (XU 2003). Der Effekt kann durch Differenzbildung von GPS-Beobachtungen reduziert werden (HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 1997).

3.2.2.6 Weitere Effekte

Bisher nicht genannt wurden die gravitativen und nichtgravitativen Störkräfte, die eine Abweichung der Satellitenbahn von einer Kepler-Ellipse bewirken und ebenfalls berücksichtigt werden müssen (SEEBER 2003). Zu den gravitativen Störkräften gehören unter anderem Gravitationskräfte von Sonne, Mond und Planeten und Unregelmäßigkeiten des Erdschwerefeldes. Die nichtgravitativen Störkräfte resultieren zum Beispiel aus dem Strahlungsdruck der Sonne, dem Albedo der Erde und dem Strömungswiderstand der Hochatmosphäre. Diese Kräfte bewirken Variationen in der Satellitenbahn, die durch zusätzlich zu den sechs Keplerelementen geschätzte Bahnparameter berücksichtigt werden (SEEBER 2003).

3.3 Laserentfernungsmessung zu Satelliten - SLR

3.3.1 Beobachtungsgleichung des SLR-Verfahrens

Die Laserentfernungsmessung zu Satelliten (engl.: *Satellite Laser Ranging* (SLR)) ist ein optisches Raumbeobachtungsverfahren. Es basiert auf der Laufzeitmessung eines von einer Bodenstation ausgesandten und von einem Satelliten reflektierten Laserpulses. Die beobachteten Satelliten sind dafür mit Retroreflektoren ausgestattet, die eine präzise Umkehrung des Signalwegs ermöglichen. In Abbildung 3.2 ist das Prinzip der Laserentfernungsmessung dargestellt.

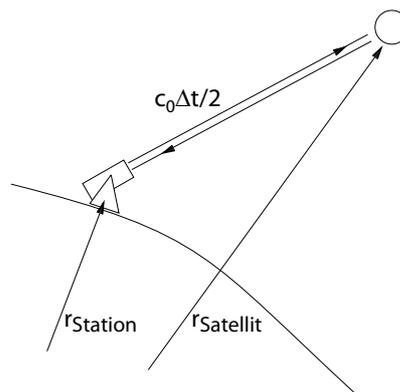


Abbildung 3.2: Prinzip der Laser-Entfernungsmessung

Während der Aussendung des Laserpulses wird ein Teil des Signals ausgekoppelt und zum Start der Zeitregistrierung verwendet. Der vom Satellit reflektierte Teil des Pulses stoppt die Zeitregistrierung, sobald er wieder am Teleskop eintrifft. Die gemessene Zeitdifferenz Δt entspricht der doppelten Laufzeit des Pulses vom Laserteleskop zum Satelliten unter der Annahme, dass Hin- und Rückweg des Signals identisch sind. Die grundlegende Beobachtungsgleichung ergibt sich damit zu:

$$d = \frac{\Delta t}{2} c_0 \quad (3.27)$$

mit Δt Laufzeit des Laserpulses
 c_0 Lichtgeschwindigkeit.

Lasermessungen werden bereits seit den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts durchgeführt (SIGL 1984). Während die ersten Laserbeobachtungen lediglich eine Genauigkeit von maximal 1 m aufwiesen, wird heute eine Genauigkeit von wenigen Millimetern erreicht (GURTNER *et al.* 2004). Für die geodätische Positions- und Schwerefeldbestimmung mit SLR werden primär die Satelliten Lageos 1 und Lageos 2 verwendet. Neben den Entfernungsmessungen zu Satelliten, werden auch Messungen zu auf dem Mond installierten Reflektoren durchgeführt (engl. Bezeichnung des Verfahrens: *Lunar Laser Ranging* (LLR)). LLR dient vorwiegend der Beobachtung der Dynamik des Erde-Mond-Systems.

Die Laserentfernungsmessung ist ein hochgenaues geodätisches Raumberechnungsverfahren, das im Vergleich zu den Mikrowellenverfahren GPS und VLBI mit direkten Streckenmessungen und nicht differentiell arbeitet. Ein weiterer Vorteil von SLR ist die günstige Ausbreitung des Laser-Signals in der Atmosphäre. Zwar sind die optischen Signale einer stärkeren Laufzeitverzögerung unterworfen als Mikrowellen, diese lässt sich jedoch gut mit einem Modell erfassen (SCHILLAK 2004) und muss nicht in der Auswertung parametrisiert werden.

Die zur Positionsbestimmung von SLR-Stationen verwendeten Satelliten Lageos 1 und Lageos 2 haben eine nahezu kugelförmige Gestalt. Die Modellierung des Strahlungsdrucks der Sonne auf den Satelliten ist deshalb sehr viel einfacher als für die GPS-Satelliten. Nachteilig ist dagegen die starke Abhängigkeit des SLR-Verfahrens gegenüber Wetterbedingungen. Beobachtungen bei Wolkenbedeckung sind nicht möglich, da Wolken für optische Signale im Gegensatz zu Mikrowellensignalen undurchlässig sind. Satelliten aller Raumberechnungsverfahren, so unter anderem auch GPS-Satelliten, können recht einfach mit Laser-Reflektoren ausgestattet werden. SLR spielt daher bei der Kalibration anderer Messverfahren eine wichtige Rolle (URSCHL *et al.* 2005).

3.3.2 Fehlereinflüsse auf SLR-Beobachtungen

Unter Berücksichtigung der auf die Laser-Beobachtungen einwirkenden Fehlereinflüsse wird die Beobachtungsgleichung 3.27 erweitert auf:

$$\Delta t = \frac{2}{c_0}(\varrho + \delta\varrho_{Atm} + \delta\varrho_r) + \delta\varrho_e + \frac{1}{c_0}\delta t + e \quad (3.28)$$

mit	ϱ	Entfernung zwischen Station und Satellit
	$\delta\varrho_{Atm}$	atmosphärische Laufzeitverzögerung
	$\delta\varrho_r$	relativistische Korrektur
	$\delta\varrho_e$	Exzentrizitäten am SLR-Teleskop und am Satellit
	δt	instrumentelle Laufzeitverzögerung
	e	verbleibende systematische und zufällige Fehler.

3.3.2.1 Exzentrizitäten

Die Exzentrizität am Teleskop ist die geometrische Entfernung zwischen dem Referenzpunkt der Station und dem Punkt, auf welchen sich die Zeitmessungen beziehen. Die Exzentrizität kann auf etwa 1 mm genau bestimmt werden. Für einige Teleskope treten in Abhängigkeit vom Elevationswinkel Variationen der Lage des Referenzpunkts auf. Diese Variationen können durch Kalibration ebenfalls auf 1 mm genau bestimmt werden (SCHILLAK 2004).

Die Exzentrizität im Satelliten beschreibt den geometrischen Abstand zwischen dem Massenschwerpunkt des Satelliten und dem Reflektionspunkt (engl.: *center of mass correction*). Diese Exzentrizität wird vor dem Start des Satelliten bestimmt, kann sich jedoch im Laufe der Operationszeit des Satelliten etwas verändern. Für die Lageos-Satelliten konnten die Exzentrizitäten auf 2 mm genau gemessen werden (MCCARTHY 1992). Jedoch werden die Photonen eines Laserpulses oftmals nicht nur von einem, sondern von mehreren auf dem Satelliten vorhandenen Reflektoren gleichzeitig reflektiert. Durch die unterschiedliche Entfernung der Reflektoren zur Bodenstation kommt es zu einer Unschärfe, der sogenannten Satellitensignatur, im reflektierten Signal (APPLEBY 1995). OTSUBO und APPLEBY (2003) zeigen, dass die *center of mass correction* von unterschiedlichen Faktoren anhängig ist, so zum Beispiel vom Lasersystem, der Signalstärke, der Pulslänge und der Wellenlänge. Für die beiden Lageos-Satelliten variiert die *center of mass correction* um jeweils bis zu 10 mm.

3.3.2.2 Atmosphärische Laufzeitverzögerung

Die Korrektur der troposphärischen Laufzeitverzögerung der bei SLR verwendeten optischen Signale muss auf andere Weise erfolgen als für Mikrowellen, da die Troposphäre ein dispersives Medium für Wellenlängen im optischen Bereich ist. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Ausbreitung von Mikrowellen ist, dass die Laufzeitverzögerung nur geringfügig vom Feuchtegehalt der Atmosphäre abhängig ist (DIETRICH 1988), der starken nicht modellierbaren Variationen unterliegt. Bei der Auswertung von Mikrowellenverfahren wird dies durch Schätzung zusätzlicher Parameter berücksichtigt. Im Falle von SLR kann hingegen die gesamte troposphärische Laufzeitverzögerung durch Modelle beschrieben werden.

Zur Berechnung der troposphärischen Laufzeitverzögerung war bis vor wenigen Jahren vor allem das Modell von MARINI und MURRAY (1973) gebräuchlich. Um für eine Beobachtung unter einem Elevationswinkel von 20° eine Beobachtungsgenauigkeit von 1 mm zu garantieren, müssen die Temperatur auf 3 K, der Luftdruck auf 0.1 hPa und die relative Luftfeuchte auf nur 20% genau bekannt sein. Die Relationen dieser Werte unterstreichen die Unempfindlichkeit der Korrektur gegenüber der Luftfeuchtigkeit.

Das Modell von MARINI und MURRAY (1973) wurde ursprünglich für Rubin-Laser entwickelt. Heute wird jedoch mit Lasern unterschiedlicher Wellenlängen gearbeitet, was die Verwendung eines erweiterten Refraktionsmodells erfordert (CIDDOR und HILL 1999). Die Umrechnung der Refraktionskorrektur von der Zenitrichtung auf die Elevation der Beobachtung erfolgt wie bei VLBI und GPS mit Hilfe von Übertragungsfunktionen. In MENDES *et al.* (2002) werden Übertragungsfunktionen basierend auf dem Modell von CIDDOR und HILL (1999) vorgestellt. Sie wurden aus Radiosondenprofilen abgeleitet und können schon für Elevationswinkel ab 3° verwendet werden. Weiterhin wurde von MENDES und PAVLIS (2004) ein verbessertes Modell zur Berechnung der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung entwickelt. Die Konventionen des IERS (MCCARTHY und PETIT 2004) empfehlen die Verwendung dieser beiden neuen Modelle. HULLEY *et al.* (2004) zeigen zudem, dass bei Verwendung von Laufzeitverzögerungen, die aus den Daten der sogenannten Strahlenverfolgung (engl.: *ray tracing*) und aus Wettermodellen berechnet werden, die Streuung der SLR-Beobachtungen für einige Stationen stark reduziert werden kann.

Unmodellerte Effekte der troposphärischen Refraktion werden durch die lokalen Eigenschaften der Atmosphäre und schnelle Variationen des Zustands der Atmosphäre entlang des Signalwegs hervorgerufen. Die Abweichung der modellierten von der tatsächlichen mit Hilfe von Radiosondenaufstiegen bestimmten Laufzeitverzögerung kann je nach Elevationswinkel mehr als 10 mm betragen (DEGNAN 1993). Sie ist damit der größte nichtmodellerte Fehleranteil.

Da die Troposphäre ein dispersives Medium für die Ausbreitung von Lichtwellen ist, ist es möglich, den Refraktionseffekt zu bestimmen, indem simultane Beobachtungen auf zwei Frequenzen ausgeführt werden. Der Dispersionseffekt führt zu einer unterschiedlichen Laufzeit der beiden Lichtsignale unterschiedlicher Wellenlänge (ABSHIRE und GARDNER (1985), HULLEY *et al.* (2004)). Bislang arbeiten jedoch weltweit nur drei SLR-Stationen mit einem Zweifarbenlaser: Zimmerwald (Schweiz), Matera (Italien) und TIGO/Conception (Chile).

Bei den hier vorgestellten Modellen zur Berücksichtigung der troposphärischen Laufzeitverzögerung wurde von einer kugelsymmetrischen geschichteten Atmosphäre ausgegangen. Die Azimutabhängigkeit der Laufzeitverzögerung kann mittels horizontaler Gradienten berücksichtigt werden, was jedoch bei der Auswertung von SLR-Beobachtungen noch nicht standardmäßig durchgeführt wird. ABSHIRE und GARDNER (1985) zeigen, dass eine Vernachlässigung der Gradienten für einen Elevationswinkel von 20° eine Verfälschung der Refraktionskorrektur von 1 cm zur Folge haben kann. Für eine Beobachtung unter 10° Elevation kann diese bis zu 5 cm betragen.

3.3.2.3 Relativistische Korrektur

Bei der Auswertung von SLR-Beobachtungen müssen, ebenso wie bei GPS, eine Reihe relativistischer Effekte berücksichtigt werden. Sie sind unter 3.2.2.5 ausführlich beschrieben. Die Effekte, die sich auf den Gang der Satellitenuhr beziehen, spielen jedoch bei SLR, das mit einer passiven Satellitenapparatur arbeitet, keine Rolle.

3.3.2.4 Weitere Fehler

Bislang unberücksichtigte konstante systematische Fehler oder Fehleranteile können in einem Streckenfehler zusammengefasst werden (SCHILLAK 2004). Dieser Streckenfehler ist die Differenz zwischen der gemessenen Strecke und der tatsächlichen Strecke, die mit Hilfe einer berechneten Satellitenbahn erhalten wird. Die Ursachen für systematische Fehler sind sehr unterschiedlich (zum Beispiel Fehler in der Modellierung der Refraktion, Kalibrationsfehler (engl.: *range bias*), Exzentrizitäten, systematische Uhrfehler (engl.: *time bias*)). Der Streckenfehler wird für eine Station als konstanter Wert entweder für einen Bahnbogen, einen Monat oder auch ein Jahr in der Ausgleichung geschätzt. Üblicherweise wird dieser Schätzwert auch als *range bias* bezeichnet, ist aber nicht mit dem Kalibrationsfehler zu verwechseln. Da das Normalgleichungssystem durch das Schätzen eines Streckenfehlers an Stabilität verliert, werden Streckenfehler nur für Stationen geschätzt, bei denen große Differenzen zwischen theoretischer und gemessener Strecke auftreten. Die entsprechenden Stationen werden vom ILRS auf der Webseite http://ilrs.gsfc.nasa.gov/working_groups/awg/SLRF2005.html (04.02.2008) angegeben.

4. Kombination geodätischer Raumbeobachtungsverfahren

4.1 Kombinationsverfahren

Die geodätischen Raumbeobachtungsverfahren weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen bei der Bestimmung einzelner geodätischer Parameter auf (zum Beispiel MONTAG *et al.* (1996)). Eine Kombination von verschiedenen komplementären Verfahren, das heisst eine gemeinsame Auswertung ihrer Beobachtungen, hat zum Ziel, die verfahrensspezifischen Stärken für das kombinierte Produkt zu nutzen und gleichzeitig die Schwächen in der Parameterbestimmung auszugleichen. Ein Beispiel dafür ist die Berechnung von UT1-UTC als kombiniertes Produkt aus GPS- und VLBI-Beobachtungen: Während VLBI das einzige der genannten Verfahren ist, aus dessen Beobachtungen die Rotation der Erde absolut bestimmt werden kann (SCHUH 2000), ist aus GPS-Beobachtungen die tägliche Änderung der Rotation mit einer Genauigkeit ableitbar, die mit VLBI nicht erreicht werden kann. Durch die Kombination wird ein sowohl auf langen als auch auf kurzen Zeitskalen stabiles Produkt erhalten. Für die rigorose Kombination und Integration der Raumbeobachtungsverfahren wurden und werden Methoden entwickelt, um das Potential der Verfahren optimal auszuschöpfen und hochgenaue und konsistente Produkte zu erhalten. Dabei werden die funktionalen Beobachtungsmodelle, die bei der Auswertung der einzelnen Beobachtungsverfahren Anwendung finden, soweit wie möglich abgeglichen. Dies betrifft die Berücksichtigung bestimmter Effekte durch Einführung von Modellwerten (zum Beispiel Gezeiten der festen Erde und des Ozeans) sowie die identische Parametrisierung im Falle gleicher Parametertypen (zum Beispiel Stationskoordinaten, EOP, troposphärische Laufzeitverzögerung). Die einheitlichen Standards sind in den Konventionen des IERS (MCCARTHY und PETIT 2004) dokumentiert. Allerdings sind diese, wie auch aus den Kapiteln 2 und 3 deutlich wurde, nicht immer eindeutig formuliert.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Aspekte der Kombination der Verfahren VLBI, GPS und SLR im Hinblick auf die Berechnung eines terrestrischen Referenzrahmens untersucht. Abbildung 4.1 gibt einen Überblick, welche geodätischen Parameter aus den Beobachtungen der einzelnen Verfahren bestimmt werden. Als *gemeinsame Parameter* werden diejenigen Parameter bezeichnet, welche aus den Beobachtungen verschiedener Verfahren abgeleitet und anschließend kombiniert werden können. *Verfahrensabhängige Parameter* werden nur aus den Beobachtungen eines Verfahrens bestimmt. Die *gemeinsamen Parameter* werden in Abbildung 4.1 zusätzlich in *globale* und *lokale (ortsbezogene) Parameter* unterteilt. Wie später noch gezeigt wird, spielen beide Parametergruppen bei der Kombination eine wichtige Rolle.

		VLBI	SLR	GPS
Gemeinsame Parameter				
globale Parameter	Polkoordinaten	✓	✓	✓
	UT1-UTC	✓		
	LOD	✓	✓	✓
	Nutationsparameter	✓		✓ ¹
	Lage des Massenzentrums der Erde		✓	✓
lokale Parameter	Maßstab	✓	✓	✓
	Stationspositionen und -geschwindigkeiten	✓	✓	✓
	Troposphärenparameter	✓		✓
Verfahrensabhängige Parameter				
Quasarkoordinaten		✓		
Satellitenbahnparameter			✓	✓
Uhrenparameter		✓		✓

¹ Aus GPS können nur die ersten zeitlichen Ableitungen der Nutationswinkel nicht aber die Nutationswinkel selbst bestimmt werden.

Abbildung 4.1: Geodätische Parameter der Raumbeobachtungsverfahren VLBI, SLR und GPS.

Die Auswertung der Beobachtungen und die Berechnung der geodätischen Parameter erfolgt im Rahmen einer Ausgleichung basierend auf dem *Gauß-Markoff-Modell*, das in Kapitel 4.2 beschrieben wird. Die Kombination der Raumbeobachtungsverfahren kann auf verschiedenen Ebenen des *Gauß-Markoff-Modells* erfolgen:

- auf der Ebene der Beobachtungen
- auf der Ebene der Normalgleichungen
- auf der Ebene der Lösungen.

Als Kombination der Beobachtungsverfahren auf der Ebene der Beobachtungen bezeichnet man die gemeinsame Auswertung der Verfahren. Für eine solche Kombination muss ein Programmpaket entwickelt werden, mit dem alle Beobachtungsverfahren ausgewertet werden können. Erste Schritte für die Realisierung einer solchen Software wurden bereits unternommen (zum Beispiel die Software GEOSAT (ANDERSEN 2000) oder ein Ansatz von COULOT *et al.* (2007)). Eine rigorose Kombination der Beobachtungen mehrerer Verfahren ist jedoch bislang nicht hinreichend gut gelungen. Der Vorteil dieser Kombinationsstrategie ist der Zugang zu den Beobachtungen aller Beobachtungsverfahren in der gemeinsamen Ausgleichung. Das bedeutet, dass zum Beispiel die Identifizierung von Ausreißern in den Beobachtungsdaten direkt in der Kombination, also aus der Gesamtheit der Information aller Beobachtungsverfahren, erfolgen kann. Auf Ebene der Normalgleichungen oder Lösungen ist dies dagegen nicht mehr möglich, und Ausreißer können nur anhand der Beobachtungen eines Verfahrens identifiziert werden. Daneben kann bei der Kombination von Beobachtungen eine Gewichtung einzelner Beobachtungen eines Verfahrens so vorgenommen werden, dass die kombinierten Parameter optimal bestimmt werden.

Die Kombination auf der Ebene der Normalgleichungen kann als gute Approximation der Kombination von Beobachtungen angesehen werden, sofern die Modellierung und Parametrisierung identischer Parameter bei der Aufstellung der eingehenden Normalgleichungen gleich gehandhabt wurde. Dafür ist eine Homogenisierung der verschiedenen Softwarepakete bezüglich aller relevanten Modelle notwendig. Dieser Schritt ist sehr aufwendig. Die Kombination von homogen prozessierten Normalgleichungen stellt aber eine echte Alternative zu einer gemeinsamen Auswertung der Beobachtungsverfahren dar und wurde in dieser Arbeit umgesetzt. Die mathematischen Grundlagen dieses Kombinationsverfahrens werden in Kapitel 4.2 beschrieben. Ein Nachteil der Kombination von Normalgleichungen ist, dass in der Ausgleichung kein Zugriff auf die ursprünglichen Beobachtungen mehr möglich ist. Damit können während der Kombination keine Ausreißer mehr identifiziert und keine Änderungen in der Gewichtung der Beobachtungen innerhalb eines Beobachtungsverfahrens vorgenommen werden (zum Beispiel eine Änderung der elevationsabhängigen Gewichtung). Ein weiteres Problem ist, dass über bereits reduzierte Parameter (vgl. Kapitel 4.2.7) nicht mehr in dem Sinne frei verfügt werden kann, dass eingeführte Pseudobeobachtungen bezüglich dieser Parameter entfernt oder zusätzliche eingeführt werden können.

Die Kombination von Lösungen wurde in der Vergangenheit vielfach angewandt, so auch für die Realisierungen der ITRF-Lösungen bis einschließlich des ITRF2005 (ALTAMIMI *et al.* 2007). Dabei gehen die aus den Lösungen der einzelnen Beobachtungsverfahren erhaltenen Parameter als Beobachtungen in die Kombination ein. Das bedeutet, dass im Gegensatz zur Kombination auf Ebene der Normalgleichungen keine Verbesserungen der Beobachtungen in der Ausgleichung geschätzt werden. Zusätzlich zu den Stationskoordinaten und EOP werden bei der Berechnung der ITRF-Lösungen Parameter einer Ähnlichkeitstransformation der Eingangslösungen auf die kombinierte Gesamtlösung bestimmt, um Unterschiede im geodätischen Datum der Eingangslösungen berücksichtigen und über das Datum der kombinierten Lösung frei verfügen zu können. Problematisch bei dieser Vorgehensweise ist, dass Stationsbewegungen zu einer zeitlichen Änderung der Netzgeometrie führen. Die für die Transformation vorausgesetzte Ähnlichkeit der einzelnen Lösungen ist damit nicht mehr gegeben. Die Stationsbewegungen können teilweise von den Transformationsparametern aufgenommen werden, die geschätzten Stationsgeschwindigkeiten und -positionen sind dann verfälscht. Von noch größerer Tragweite ist, dass sich durch die Schätzung von Translationsparametern zwischen den Eingangslösungen der Koordinatenursprung einer einzelnen Lösung nicht mehr im Massenzentrum der Erde befindet. Ausserdem sind durch die Schätzung eines Maßstabsparameters für jede eingehende Lösung, diese nicht mehr streng metrisch, da eine Dilatation des Netzes zugelassen wird. Die Festlegung des Ursprungs und des Maßstabs der kombinierten Lösung erfolgt durch die Einführung von Summenbedingungen (für den mittleren Wert und die erste zeitliche Ableitung) über die geschätzten Translationen beziehungsweise die geschätzten Maßstabsparameter. Sind die Transformationsparameter jedoch durch Stationsbewegungen verfälscht, ist der resultierende Referenzrahmen weder streng im Massenzentrum der Erde gelagert, noch streng metrisch. Die Konventionen des IERS für den ITRF (vergleiche Kapitel 2.1) sind dann nicht erfüllt (DREWES 2008). Ein weiterer Nachteil bei der Kombination von Lösungen ergibt sich daraus, dass für jede der eingehenden Lösungen über das geodätische Datum verfügt werden muss.

Um eine Deformation der Lösungen und damit auch der kombinierten Lösung auszuschließen, dürfen nur sogenannte *Minimumsbedingungen* (oder auch *nicht deformierende Bedingungen*) verwendet werden (siehe auch Kapitel 4.2.8). Andere Bedingungen führen hingegen zu einer Deformation der eingehenden und damit auch der kombinierten Lösung.

4.2 Mathematische Grundlagen der Kombination von Normalgleichungen

In diesem Kapitel werden die mathematischen Grundlagen für die Kombination von Normalgleichungen beschrieben. Sie sind die Basis für die in den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 beschriebenen Kombinationsmodelle. Die angegebenen Gleichungen und Herleitungen basieren im Wesentlichen auf den Veröffentlichungen von KOCH (1997), MERVART (2000) und ANGERMANN *et al.* (2004).

4.2.1 Grundlagen der Ausgleichsrechnung

Die Schätzung unbekannter Parameter aus geodätischen Beobachtungen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nach dem linearen Ausgleichsmodell nach *Gauß-Markoff*. Die Grundlage für dieses Modell bildet die Darstellung der Erwartungswerte der Beobachtungen \mathbf{b} als Linearkombinationen aus bekannten Koeffizienten und den unbekanntem Parametern \mathbf{p} (KOCH 1997):

$$\mathbf{E}(\mathbf{b}) = \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{4.1}$$

mit $\mathbf{E}(\mathbf{b})$ $n \times 1$ Vektor der Erwartungswerte der Beobachtungen
 \mathbf{A} $n \times u$ Koeffizientenmatrix, $rg(A) = u$
 $\mathbf{x} = \mathbf{p} - \mathbf{p}_0$ $u \times 1$ Variablenvektor (Vektor der geschätzten Korrekturen zu \mathbf{p}_0)
 \mathbf{p} $u \times 1$ Parametervektor
 \mathbf{p}_0 $u \times 1$ Vektor der Näherungswerte der Parameter \mathbf{p} .

Diese Gleichung ist der *deterministische Teil* des Gauß-Markoff-Modells (GMM). Die Abhängigkeit der Beobachtungen von den Parametern ergibt sich aus physikalischen oder mathematischen Gesetzmäßigkeiten oder aus geometrischen Zusammenhängen. Die Linearität des Systems wird, wenn nötig, durch eine Linearisierung der Beobachtungsgleichungen erreicht. Dabei werden die Beobachtungsgleichungen in TAYLOR-Reihen entwickelt und die Beobachtung mittels hinreichend guter Näherungswerte \mathbf{p}_0 für die unbekanntem Parameter \mathbf{p} approximiert.

Im Allgemeinen wird die Anzahl der Beobachtungen größer als die Anzahl der Unbekannten gewählt, um den Einfluss einer einzelnen Beobachtungen auf die Schätzwerte zu reduzieren. Für $n > u$ ist das Gleichungssystem

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \tag{4.2}$$

aber in der Regel nicht konsistent. Das bedeutet, es gibt nicht zu jedem Beobachtungsvektor \mathbf{b} einen Variablenvektor \mathbf{x} , der die Gleichung 4.2 erfüllt. Durch Addition eines Residuenvektors \mathbf{v} wird ein konsistentes System erhalten:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} + \mathbf{v} \quad \text{mit: } \mathbf{E}(\mathbf{b}) = \mathbf{b} + \mathbf{v} \quad \text{und} \quad \mathbf{E}(\mathbf{v}) = \mathbf{0}. \tag{4.3}$$

Die Gleichung wird auch als *Beobachtungsgleichung* oder *Verbesserungsgleichung der Beobachtungen* bezeichnet. Es wird angenommen, die Beobachtungen seien Zufallswerte mit einer bekannten Varianz-Kovarianzmatrix. Sie wird, bis auf den Faktor σ_0^2 , der das gemeinsame Varianzniveau aller Parameter beschreibt, als bekannt vorausgesetzt:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{bb}} = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1} \tag{4.4}$$

mit $\mathbf{C}_{\mathbf{bb}}$ $n \times n$ Varianz-Kovarianzmatrix der Beobachtungen
 \mathbf{P}^{-1} $n \times n$ Gewichtsmatrix der Beobachtungen, positiv definit
 σ_0^2 a posteriori Varianzfaktor der Gewichtseinheit.

Gleichung 4.4 ist der *stochastische Teil* des Gauß-Markoff-Modells.

Für $n > u$ gibt es keine eindeutige Lösung der Gleichung 4.2. Eine mögliche Lösung kann durch eine Schätzung der unbekannt Parameter nach der *Methode der kleinsten Quadrate* (MkQ) erhalten werden. Dabei sind die unbekannt Parameter so zu bestimmen, dass die Quadratsumme der Beobachtungsresiduen $\hat{\mathbf{v}} = (\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{b})$ minimal wird, also dass gilt:

$$S(\mathbf{x}) = (\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{b})^T \mathbf{P} (\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{b}) = \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}} \doteq \text{Min.} \quad (4.5)$$

Es wird eine beste, lineare, erwartungstreue Schätzung erhalten. Ein Minimum hat die Funktion $S(\mathbf{x})$ an der Stelle $dS(\mathbf{x})/d\mathbf{x} = 0$. Damit ergibt sich die Lösung der sogenannten Normalgleichung $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$ aus:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b}. \quad (4.6)$$

Mit der Normalgleichungsmatrix $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ und $\mathbf{y} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$ folgt:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{y}. \quad (4.7)$$

Für die Schätzung der Varianz $\hat{\sigma}_0^2$ wird ebenfalls Erwartungstreue gefordert. Das heisst, es muss $E(\hat{\sigma}_0^2) = \sigma_0^2$ gelten. Diese Forderung wird durch die Schätzung

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}}}{n - u} \quad (4.8)$$

erfüllt. Die Beziehung zwischen der Quadratsumme der Beobachtungen und der Quadratsumme der Residuen lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$\mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b} - \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{y}^T \hat{\mathbf{x}}. \quad (4.9)$$

Die Varianz-Kovarianzmatrix der geschätzten Parameter wird durch Fehlerfortpflanzung aus der Varianz-Kovarianzmatrix der Beobachtungen $\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{bb}} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{P}^{-1}$ mit der geschätzten Varianz $\hat{\sigma}_0^2$ abgeleitet:

$$\hat{\mathbf{C}}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{P}^{-1} (\mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P})^T = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}. \quad (4.10)$$

4.2.2 Addition von Normalgleichungssystemen

Stimmen zwei Normalgleichungssysteme 1 und 2 in ihren Parametervektoren \mathbf{p} sowie dem Vektor der Näherungswerte \mathbf{p}_0 überein, so können beide addiert werden. Im Folgenden wird die Addition zweier Normalgleichungssysteme auch als *Kombination* bezeichnet. Die kombinierte Beobachtungsgleichung hat die Elemente:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Unter der Annahme, dass die Beobachtungen beider Systeme unabhängig sind, nimmt die Varianz-Kovarianzmatrix der kombinierten Beobachtungen die folgende Form an:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{bb}} = \begin{bmatrix} \sigma_{01}^2 \mathbf{P}_1^{-1} & 0 \\ 0 & \sigma_{02}^2 \mathbf{P}_2^{-1} \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Ist der a priori Varianzfaktor des kombinierten Systems $\sigma_0^2 = 1$, ergibt sich die Gewichtsmatrix der kombinierten Beobachtungen zu (KOCH 1999):

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{01}^2} \mathbf{P}_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{02}^2} \mathbf{P}_2 \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Für die Elemente des kombinierten Normalgleichungssystems folgt entsprechend:

$$\mathbf{N} = \frac{1}{\sigma_{01}^2} \mathbf{N}_1 + \frac{1}{\sigma_{02}^2} \mathbf{N}_2 \quad (4.14)$$

$$\mathbf{y} = \frac{1}{\sigma_{01}^2} \mathbf{y}_1 + \frac{1}{\sigma_{02}^2} \mathbf{y}_2 \quad (4.15)$$

$$\mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b} = \frac{1}{\sigma_{01}^2} \mathbf{b}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{b}_1 + \frac{1}{\sigma_{02}^2} \mathbf{b}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{b}_2. \quad (4.16)$$

Haben die beiden Normalgleichungssysteme 1 und 2 nicht denselben Parametervektor, so müssen die Parametervektoren vor der Addition angeglichen werden. Dieses wird realisiert, indem der Parametervektor jedes Systems um die zusätzlichen Parameter des anderen Systems erweitert wird, und die entsprechenden Elemente der Normalgleichungsmatrix mit Nullen aufgefüllt werden.

Eine Gewichtung der Normalgleichungssysteme kann durch das Einführen von Gewichtungsfaktoren λ_1 und λ_2 erfolgen. Die Gleichungen 4.14, 4.15 und 4.16 ergeben sich dann zu

$$\mathbf{N} = \lambda_1 \frac{1}{\sigma_{01}^2} \mathbf{N}_1 + \lambda_2 \frac{1}{\sigma_{02}^2} \mathbf{N}_2 \quad (4.17)$$

$$\mathbf{y} = \lambda_1 \frac{1}{\sigma_{01}^2} \mathbf{y}_1 + \lambda_2 \frac{1}{\sigma_{02}^2} \mathbf{y}_2 \quad (4.18)$$

$$\mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b} = \lambda_1 \frac{1}{\sigma_{01}^2} \mathbf{b}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{b}_1 + \lambda_2 \frac{1}{\sigma_{02}^2} \mathbf{b}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{b}_2. \quad (4.19)$$

4.2.3 Anpassung der Näherungswerte zweier Normalgleichungssysteme

Sollen zwei Normalgleichungssysteme 1 und 2 mit gleichem Parametervektor $\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_2$ aber unterschiedlichen Näherungswerten der Parameter \mathbf{p}_{0i} ($i = 1, 2$) addiert werden, so muss das eine System auf die Näherungswerte des anderen transformiert werden. Für zwei Beobachtungsgleichungen

$$\mathbf{A}_i \mathbf{x}_i = \mathbf{b}_i + \mathbf{v}_i \quad \text{mit} \quad \mathbf{x}_i = \mathbf{p} - \mathbf{p}_{0i} \quad (i = 1, 2), \quad (4.20)$$

wobei sich \mathbf{x}_i aus der Linearisierung des Parametervektors \mathbf{p} ergibt, kann die Korrektur \mathbf{x}_2 mit Hilfe von \mathbf{x}_1 ausgedrückt werden als:

$$\mathbf{x}_2 = \mathbf{p} - \mathbf{p}_{01} + \mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02} = \mathbf{x}_1 + (\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02}). \quad (4.21)$$

Wird dieser Ausdruck in die Gleichungen 4.2, 4.7 und 4.9 eingeführt, ergeben sich die folgenden Transformationsgleichungen für die Komponenten der Beobachtungsgleichung, der Normalgleichung und der Quadratsumme des Vektors der Beobachtungen des zweiten Systems:

$$\tilde{\mathbf{A}}_2 \mathbf{x}_1 = \tilde{\mathbf{b}}_2 \quad \text{mit} \quad \tilde{\mathbf{A}}_2 = \mathbf{A}_2 \quad \text{und} \quad \tilde{\mathbf{b}}_2 = \mathbf{b}_2 - \mathbf{A}_2 (\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02}). \quad (4.22)$$

$$\tilde{\mathbf{N}}_2 \mathbf{x}_1 = \tilde{\mathbf{y}}_2 \quad \text{mit} \quad \tilde{\mathbf{N}}_2 = \mathbf{N}_2 \quad \text{und} \quad \tilde{\mathbf{y}}_2 = \mathbf{b}_2 - \mathbf{N}_2 (\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02}) \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{b}}_2^T \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{b}}_2 &= \mathbf{b}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{b}_2 - 2(\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02})^T \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{b}_2 + (\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02}) \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_2 (\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02}) \\ &= \mathbf{b}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{b}_2 - 2(\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02})^T \mathbf{y}_2 + (\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02})^T \mathbf{N}_2 (\mathbf{p}_{01} - \mathbf{p}_{02}). \end{aligned} \quad (4.24)$$

4.2.4 Transformation des Parametervektors

Ein gegebener Parametervektor \mathbf{p} mit den Näherungswerten \mathbf{p}_0 und den Variablen $\mathbf{x} = \mathbf{p} - \mathbf{p}_0$ kann mittels einer affinen Transformation in einen neuen Parametervektor $\tilde{\mathbf{p}}$ überführt werden:

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{R} \mathbf{p} + \mathbf{d}, \quad \tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{R} \mathbf{p} + \mathbf{d}, \quad \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{R} \mathbf{x}. \quad (4.25)$$

Dabei ist \mathbf{R} die Transformationsmatrix und \mathbf{d} der Transformationsvektor der affinen Transformation. Für die Anwendung in der Beobachtungs- und Normalgleichung muss die inverse Transformationsgleichung mit $\mathbf{T} = \mathbf{R}^{-1}$ aufgestellt werden:

$$\mathbf{p} = \mathbf{T}(\tilde{\mathbf{p}} - \mathbf{d}), \quad \mathbf{x} = \mathbf{T}\tilde{\mathbf{x}}. \quad (4.26)$$

Für die transformierte Beobachtungsgleichung ergibt sich damit:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}\mathbf{T}, \quad \tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b}, \quad \tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{P}. \quad (4.27)$$

Die Komponenten der transformierten Normalgleichung lassen sich wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{N}} &= \mathbf{T}^T \mathbf{N} \mathbf{T}, & \tilde{\mathbf{y}} &= \mathbf{T}^T \mathbf{y}, \\ \tilde{\mathbf{b}}^T \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{b}} &= \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b}, & \tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{v}} &= \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

a) Transformation der Näherungswerte

Die Transformation der Normalgleichung auf neue Näherungswerte ist ein spezieller Fall der Parametertransformation, da der Parametervektor \mathbf{p} selbst unverändert bleibt. Die Beziehung zwischen alten und neuen Näherungswerten \mathbf{p}_0 und $\tilde{\mathbf{p}}_0$ kann als Translation beschrieben werden:

$$\tilde{\mathbf{p}}_0 = \mathbf{p}_0 + \mathbf{t}, \quad \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{t}. \quad (4.29)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 4.29 in Gleichung 4.2 werden die Komponenten der transformierten Beobachtungsgleichung erhalten:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}, \quad \tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{t}, \quad \tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{P}. \quad (4.30)$$

Für die Normalgleichung und $\mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$ ergeben sich damit folgende Transformationsgleichungen:

$$\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{N} \quad (4.31)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \mathbf{N}\mathbf{t} \quad (4.32)$$

$$\tilde{\mathbf{b}}^T \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b} - \mathbf{t}^T (2\mathbf{y} - \mathbf{N}\mathbf{t}). \quad (4.33)$$

b) Transformation der Parameter auf eine neue Referenzepoche

Enthält der Parametervektor eines Normalgleichungssystems neben den eigentlichen Parametern auch deren zeitliche Ableitung, so kann durch eine Epochentransformation die Referenzepoche der Parameter verändert werden. Die neuen Näherungswerte \mathbf{p}_{0t} der Parameter zur Referenzepoche t ergeben sich aus den ursprünglichen Näherungswerten \mathbf{p}_{0t_0} zur Referenzepoche t_0 und den Näherungswerten der ersten zeitlichen Ableitungen von \mathbf{p} , $\dot{\mathbf{p}}$:

$$\mathbf{p}_{0t_0} = \mathbf{p}_{0t} + \dot{\mathbf{p}}(t_0 - t). \quad (4.34)$$

Für den Variablenvektor $\mathbf{x}(t_0)$ ergibt sich entsprechend:

$$\mathbf{x}_{t_0} = \mathbf{x}_t + \dot{\mathbf{x}}(t_0 - t), \quad (4.35)$$

oder ausgedrückt für eine Variable $x(t_0)$ und ihre erste zeitliche Ableitung $\dot{x}(t_0)$ in Matrizenschreibweise:

$$\begin{bmatrix} x(t_0) \\ \dot{x}(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

Wird

$$\mathbf{T}^T = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

in die Gleichung 4.28 eingesetzt, ergibt sich für die Terme der transformierten Normalgleichung:

$$\tilde{\mathbf{N}}(t) = \mathbf{T}^T \mathbf{N}(t_0) \mathbf{T} \quad (4.38)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{T}^T \mathbf{y}(t_0). \quad (4.39)$$

Die Quadratsumme der Beobachtungen $\mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$ und die Quadratsumme der Residuen $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$ bleiben unbeeinflusst.

c) Transformation zwischen verschiedenen Parametrisierungen

Die zeitlich lineare Abhängigkeit eines Parameters innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls kann auf verschiedene Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die erste zeitliche Ableitung $\dot{p}(t)$ als Parameter zu schätzen. So ist es üblich, tägliche EOP-Werte zu schätzen und deren zeitabhängige Änderung pro Tag durch eine ebenfalls geschätzte erste zeitliche Ableitung zu approximieren. Die zeitlich lineare Abhängigkeit eines Parameters innerhalb eines Zeitintervalls kann aber auch dadurch berücksichtigt werden, dass je ein Parameter an den Intervallgrenzen als Funktionswert einer Geraden geschätzt wird, die die zeitliche Abhängigkeit beschreibt. Die zweite Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die zu lösende Normalgleichung im Allgemeinen stabiler ist, da nur der Parameter, nicht aber seine erste zeitliche Ableitung geschätzt werden muss, was zu einer Verbesserung der Kondition des Normalgleichungssystems führt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass durch Addition der Parameter an den Intervallgrenzen Stetigkeit erreicht werden kann, was zusätzlich zu einer Reduzierung der Anzahl der zu schätzenden Parameter führt. Im Falle einer Parametrisierung der ersten zeitlichen Ableitungen müssen dagegen zum Erreichen der Stetigkeit zusätzliche Bedingungen eingeführt werden, dabei bleibt die Anzahl der Parameter jedoch gleich.

Da die zweite Form der Darstellung deutliche Vorteile gegenüber der ersten aufweist, wird sie in dieser Arbeit verwendet. Eine Transformation zwischen beiden Parametrisierungen

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \tilde{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

kann erfolgen mittels

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} t_2 - t & t - t_1 \\ t_2 - t_1 & t_2 - t_1 \\ -1 & 1 \\ t_2 - t_1 & t_2 - t_1 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{T} \tilde{\mathbf{p}}, \quad (4.41)$$

wobei t die Epoche des Parameters p ist und t_1 und t_2 die Epochen der Parameter \tilde{p}_1 und \tilde{p}_2 sind. Die transformierte Normalgleichung ergibt sich zu

$$\mathbf{T}^T \mathbf{N} \mathbf{T} \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{T}^T \mathbf{y}. \quad (4.42)$$

4.2.5 Schätzung von Parametern einer Ähnlichkeitstransformation

Haben zwei Lösungen einen Satz gemeinsamer Stationskoordinaten, so können mögliche kleine Datumssdifferenzen zwischen den Netzen durch 7 Parameter einer Ähnlichkeitstransformation (3 Translationen, 3 Rotationen, 1 Skalierungsfaktor) ausgedrückt werden. Wenn auch die Stationsgeschwindigkeiten in den Lösungen enthalten sind, sind 14 Parameter (7 Parameter und deren erste zeitliche Ableitung) notwendig. Seien $\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1$ und $\hat{x}_2, \hat{y}_2, \hat{z}_2$ die Komponenten der Lösungsvektoren, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ die Translationsparameter, α, β, γ die Rotationswinkel und μ der Skalierungsfaktor, so nimmt die Transformationsgleichung im Falle einer 7-Parameter-Ähnlichkeitstransformation und unter Voraussetzung kleiner Rotationswinkel die folgende vereinfachte Form an:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{y}_1 \\ \hat{z}_1 \end{bmatrix} = (1 + \mu) \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_2 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (4.43)$$

Aufgrund der Linearität des Gleichungssystems, kann dieses auch geschrieben werden als:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{y}_1 \\ \hat{z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_2 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i^0 & -y_i^0 & x_i^0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_i^0 & 0 & x_i^0 & y_i^0 \\ 0 & 0 & 1 & y_i^0 & -x_i^0 & 0 & z_i^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \mu \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Für eine 14-Parameter-Ähnlichkeitstransformation nimmt die Gleichung die Form an:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{y}_1 \\ \hat{z}_1 \\ \hat{x}_1 \\ \hat{y}_1 \\ \hat{z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_2 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{z}_2 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i^0 & -y_i^0 & x_i^0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_i^0 & 0 & x_i^0 & y_i^0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & y_i^0 & -x_i^0 & 0 & z_i^0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & z_i^0 & -y_i^0 & x_i^0 & 1 & 0 & 0 & 0 & z_i^0 & -y_i^0 & x_i^0 \\ 0 & 0 & 0 & -z_i^0 & 0 & x_i^0 & y_i^0 & 0 & 1 & 0 & -z_i^0 & 0 & x_i^0 & y_i^0 \\ 0 & 0 & 0 & y_i^0 & -x_i^0 & 0 & z_i^0 & 0 & 0 & 1 & y_i^0 & -x_i^0 & 0 & z_i^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \mu \\ \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{y} \\ \Delta \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\mu} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

oder in kompakter Schreibweise für eine Station i :

$$\hat{\mathbf{x}}_{1_i} = \hat{\mathbf{x}}_{2_i} + \mathbf{H}_i \boldsymbol{\xi} .$$

Unter Berücksichtigung aller Stationen, die zur Schätzung der Transformationsparameter beitragen sollen, wird diese Gleichung zu

$$\hat{\mathbf{x}}_1 = \hat{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{H}\boldsymbol{\xi} \quad (4.46)$$

mit

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} x_{1_1} \\ x_{1_2} \\ \dots \\ x_{1_n} \end{bmatrix}, \mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} x_{2_1} \\ x_{2_2} \\ \dots \\ x_{2_n} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} H_{1_1} \\ H_{1_2} \\ \dots \\ H_{1_n} \end{bmatrix} . \quad (4.47)$$

Da diese Gleichung in aller Regel nicht konsistent ist, ergibt sich mit $\mathbf{P} = \mathbf{I}$ die Verbesserungsgleichung der Beobachtungen zu

$$\mathbf{v} = \mathbf{H}\boldsymbol{\xi} - (\hat{\mathbf{x}}_1 - \hat{\mathbf{x}}_2). \quad (4.48)$$

Die Normalgleichung wird entsprechend zu

$$\mathbf{H}\mathbf{H}^T \boldsymbol{\xi} = \mathbf{H}^T (\hat{\mathbf{x}}_1 - \hat{\mathbf{x}}_2). \quad (4.49)$$

Mit

$$\delta \mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}_1 - \hat{\mathbf{x}}_2 \quad (4.50)$$

ergibt sich für die Lösung der Transformationsparameter

$$\boldsymbol{\xi} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \delta \mathbf{x}. \quad (4.51)$$

4.2.6 Einführung zusätzlicher Parameter

Die Erweiterung eines linearen Normalgleichungssystems um zusätzliche Parameter kann erfolgen, sofern diese in einer linearen Beziehung zu den bereits vorhandenen Parametern stehen. Diese Relation kann auch als affine Transformation des alten Parametervektors \mathbf{p} (siehe 4.2.4) angesehen werden. Zwischen dem alten und dem neuen Parametervektor, \mathbf{p} und $\tilde{\mathbf{p}}$, sowie den zusätzlichen Parametern \mathbf{q} besteht entsprechend Gleichung 4.26 folgende Beziehung:

$$\mathbf{p} = \mathbf{T}(\tilde{\mathbf{p}} - \mathbf{d}) + \mathbf{S}\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{p}} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} - \mathbf{T}\mathbf{d}. \quad (4.52)$$

Die Transformation der Näherungswerte \mathbf{p}_0 erfolgt entsprechend der von \mathbf{p} mit

$$\tilde{\mathbf{p}}_0 = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{p}_0 + \mathbf{d} - \mathbf{T}^{-1}\mathbf{S}\mathbf{q}_0. \quad (4.53)$$

Für den Variablenvektor \mathbf{x} ergibt sich somit

$$\mathbf{x} = \mathbf{T}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{S}\xi = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \\ \xi \end{bmatrix}, \quad (4.54)$$

wobei ξ der Vektor der Korrekturen der neuen Parameter, $\xi = \mathbf{q} - \mathbf{q}_0$, ist. Die Komponenten der transformierten Beobachtungsgleichung berechnen sich hiernach wie folgt:

$$\tilde{\mathbf{A}} = [\mathbf{A}\mathbf{T} \ \mathbf{A}\mathbf{S}], \quad \tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b}, \quad \tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{P}. \quad (4.55)$$

Für die Normalgleichung, $\mathbf{b}^T\mathbf{P}\mathbf{b}$ und $\mathbf{v}^T\mathbf{P}\mathbf{v}$ ergibt sich entsprechend

$$\tilde{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^T\mathbf{N}\mathbf{T} & \mathbf{T}^T\mathbf{N}\mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T\mathbf{N}\mathbf{T} & \mathbf{S}^T\mathbf{N}\mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^T\mathbf{y} \\ \mathbf{S}^T\mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

$$\tilde{\mathbf{b}}^T\tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b}^T\mathbf{P}\mathbf{b} \quad (4.58)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}^T\tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}^T\mathbf{P}\mathbf{v}. \quad (4.59)$$

Beispiel: Einführung einer ersten zeitlichen Ableitung

Die Parameter \mathbf{p} unterliegen einer zeitlichen Variabilität. Der Parametervektor \mathbf{p} sei jedoch zunächst repräsentiert durch ein konstantes Modell zu einer mittleren Epoche:

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}(t_0). \quad (4.60)$$

Da die zeitliche Abhängigkeit der Parameter nicht berücksichtigt wird, entspricht dieses Modell für jeden einzelnen Parameter p einer Entwicklung seines zeitabhängigen Verhaltens in eine TAYLOR-Reihe, die nach dem ersten Glied abgebrochen wird.

Für ein lineares Modell ergibt sich statt dessen der Ausdruck:

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}(t_0) + (t - t_0)\dot{\mathbf{p}}(t_0), \quad (4.61)$$

der einem Abbruch der TAYLOR-Entwicklung nach dem zweiten Glied entspricht.

Die Überführung des konstanten Modells in ein lineares Modell erfolgt durch die Einführung der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{\mathbf{p}}(t_0)$. Der neue Parametervektor setzt sich damit aus den Parametern $\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{p}(t_0)$ zur Epoche t_0 und den neu eingeführten zeitlichen Ableitungen der Parameter $\mathbf{q} = \dot{\mathbf{p}}(t_0)$ an der Stelle t_0 zusammen.

Aus 4.61 und 4.52 ergibt sich damit die Beziehung zwischen ursprünglichem und neuem Parametervektor:

$$\mathbf{p} = \mathbf{T}(\tilde{\mathbf{p}}(t_0) - \mathbf{d}) + \mathbf{S}\dot{\mathbf{p}}(t_0), \quad (4.62)$$

mit

$$\mathbf{T} = \mathbf{I}, \quad \mathbf{d} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{S} = \Delta t \cdot \mathbf{I}. \quad (4.63)$$

Für die erweiterte Normalgleichung ergibt sich damit

$$\tilde{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^T \mathbf{N} \mathbf{T} & \mathbf{T}^T \mathbf{N} \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T \mathbf{N} \mathbf{T} & \mathbf{S}^T \mathbf{N} \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^T \mathbf{y} \\ \mathbf{S}^T \mathbf{y} \end{bmatrix}. \quad (4.65)$$

Die mittlere Epoche t sowie auch die gewählte Anfangsepoche t_0 sind nicht unbedingt für alle Parameter eines Systems gleich. Dann wird die Hauptdiagonale der Matrix \mathbf{S} zu $\text{diag}(\mathbf{S}) = (\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n)$.

4.2.7 Reduktion von Variablen

Die Reduktion von Variablen aus einem Gleichungssystem dient der Verringerung der Dimension des Gleichungssystems, ohne dabei die Lösung für die verbleibenden Variablen zu verändern. Die Reduktionsgleichung beschreibt dabei den Effekt der zu reduzierenden auf die verbleibenden Parameter. Zunächst wird die Normalgleichung so umgestellt, dass sich der Variablenvektor in zwei Teile \mathbf{x}_1 und \mathbf{x}_2 aufspalten lässt. Dabei enthält der Teilvektor \mathbf{x}_1 die zu reduzierenden und der Teilvektor \mathbf{x}_2 die verbleibenden Variablen:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{12} & \mathbf{N}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix}. \quad (4.66)$$

Nach Multiplikation der ersten Zeile des Normalgleichungssystems mit \mathbf{N}_{11}^{-1} kann diese geschrieben werden als

$$\mathbf{x}_1 + \mathbf{N}_{11}^{-1} \mathbf{N}_{12} \mathbf{x}_2 = \mathbf{N}_{11}^{-1} \mathbf{y}_1. \quad (4.67)$$

Durch weitere Multiplikation der Gleichung 4.67 mit \mathbf{N}_{12}^T und Subtraktion der Gleichung 4.67 von der zweiten Zeile des Normalgleichungssystems wird die um die Variablen \mathbf{x}_1 reduzierte Normalgleichung erhalten:

$$\tilde{\mathbf{N}} \mathbf{x}_2 = \tilde{\mathbf{y}} \quad \text{mit} \quad (4.68)$$

$$\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{N}_{22} - \mathbf{N}_{12}^T \mathbf{N}_{11}^{-1} \mathbf{N}_{12} \quad \text{und} \quad \tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y}_2 - \mathbf{N}_{12}^T \mathbf{N}_{11}^{-1} \mathbf{y}_1. \quad (4.69)$$

Die Reduktion der Quadratsumme der Beobachtungen erfolgt durch:

$$\tilde{\mathbf{b}}^T \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b} - \mathbf{y}_1^T \mathbf{N}_{11}^{-1} \mathbf{y}_1. \quad (4.70)$$

Gleichung 4.67 ist die sogenannte Rückauflösungsgleichung. Mit ihr können die reduzierten Variablen \mathbf{x}_1 aus dem Lösungsvektor \mathbf{x}_2 berechnet werden.

4.2.8 Ausgleichung unter Verwendung von Pseudobeobachtungen

Es kann erwünscht sein, dass die unbekannt Parameter einer Ausgleichung zusätzliche Bedingungen (Restriktionen) erfüllen. Die Einführung solcher Bedingungen kann auf verschiedene Weise erfolgen. Eine Möglichkeit besteht darin, Bedingungsgleichungen in die Ausgleichung einzuführen, die von den geschätzten Parametern vollständig erfüllt werden (*Gauß-Markoff-Modell mit linearen Restriktionen*) (KOCH 1999). Alternativ werden die Bedingungen als Beobachtungen mit einer Standardabweichung betrachtet und als solche in die Ausgleichung eingeführt. Diese Bedingungen werden auch als Pseudobeobachtungen bezeichnet. Durch die Wahl der Standardabweichung kann die Wirkung der Bedingung auf die geschätzten Parameter bestimmt werden. Das Verfahren ist damit wesentlich flexibler als das erstgenannte und findet in dieser Arbeit Anwendung. Wird die Standardabweichung der Bedingung zu Null gesetzt, sind beide Ansätze identisch.

Die Bedingungen in Form von Pseudobeobachtungen können auf Ebene der Beobachtungen oder als ein Normalgleichungssystem

$$\mathbf{H}^T \mathbf{P}_h \mathbf{H} \mathbf{x} = \mathbf{H}^T \mathbf{P}_h \mathbf{h} \quad (4.71)$$

auf Ebene der Normalgleichungen in die Ausgleichung eingeführt werden. Dabei ist \mathbf{H} die Koeffizientenmatrix der Pseudobeobachtungen und \mathbf{h} der Vektor der Pseudobeobachtungen. Die Gewichtsmatrix \mathbf{P}_h der Pseudobeobachtungen ist in aller Regel eine Diagonalmatrix und enthält die Varianzen der Pseudobeobachtungen:

$$P_{h_{ii}} = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}. \quad (4.72)$$

Durch Addition der Bedingungen wird das folgende Normalgleichungssystem erhalten:

$$(\mathbf{N} + \mathbf{H}^T \mathbf{P}_h \mathbf{H}) \mathbf{x} = \mathbf{b} + \mathbf{H}^T \mathbf{P}_h \mathbf{h}. \quad (4.73)$$

Die gewünschte Wirkung der Pseudobeobachtung auf das Normalgleichungssystem kann durch geeignete Wahl der a priori Varianzen $P_{h_{ii}}$ erreicht werden.

Liegt eine singuläre Normalgleichungsmatrix mit einem Rangdefekt vor ($rg(\mathbf{N}) < \mathbf{u}$), kann dieser durch die Einführung geeigneter Bedingungen behoben werden. In den für diese Arbeit notwendigen Berechnungen treten Rangdefekte bezüglich des geodätischen Datums auf. Um diese zu beheben, finden die im Folgenden beschriebenen Bedingungsgleichungen Anwendung. Sie sind sogenannte *Minimumsbedingungen*. Der Rang der Normalgleichungsmatrix der Bedingungen \mathbf{H} entspricht dabei dem Rangdefekt von \mathbf{N} ($rg(\mathbf{H}) = \mathbf{u} - rg(\mathbf{N})$), und durch die Einführung der Bedingungen erhält die Normalgleichungsmatrix vollen Rang. Bedingungen, deren Rang größer ist als der Rangdefekt der Normalgleichungsmatrix, führen zu einer Deformation der Lösung. Sie werden auch als *deformierende Bedingungen* bezeichnet.

a) *No-net-translation* - Bedingung in Bezug auf einen Referenzkoordinatensatz

Als translationsfrei in Bezug auf ein Referenznetz wird ein Netz von Punkten dann bezeichnet, wenn die gewichtete Summe der Geschwindigkeiten dieser Punkte relativ zur gewählten Referenz gleich Null ist. Das Netz erfährt dann keine zeitabhängige Verschiebung (Translation) gegenüber dem Referenznetz. Als Translation wird oftmals aber auch die Verschiebung des Netzscherpunkts beim Übergang von einem Netz von Punkten auf ein zweites, anders gelagertes Netz zu einem bestimmten Zeitpunkt bezeichnet (vergl. Kapitel 4.2.5). Die in dieser Arbeit verwendete *no-net-translation* - Bedingung setzt sich aus zwei einzelnen Bedingungen zusammen und bewirkt, dass ein auszugleichendes Netz von Stationskoordinaten weder eine Verschiebung des Koordinatenursprungs noch eine Translation gegenüber einem ausgewählten Satz an Näherungskordinaten erfährt. Da die Translation eines Netzes auch als lineare Bewegung seines Schwerpunkts $\Delta \mathbf{r}_M$ angesehen werden kann, muss in der Ausgleichung die Summe aller Korrekturen der Stationspositionsvektoren $\Delta \mathbf{r}_i$ der Stationen $i = 1, \dots, n$ zu Null werden. Werden zusätzlich Gewichte μ_i ($\mu_i > 0, \sum_{i=1}^n \mu_i = 1$) für die Stationsvektoren eingeführt, kann der zeitunabhängige Teil der *no-net-translation* - Bedingung geschrieben werden als:

$$\Delta \mathbf{r}_M = \sum_{i=1}^n \mu_i \Delta \mathbf{r}_i = \mathbf{0}. \quad (4.74)$$

Er bewirkt, dass der Schwerpunkt der Koordinaten eines starren Netzes (Geschwindigkeiten $\mathbf{v}_i = \mathbf{0}$) dem Schwerpunkt der Näherungskordinaten entspricht. Sind die Geschwindigkeiten $\mathbf{v}_i \neq \mathbf{0}$, gilt diese Bedingung nur zur Referenzepoche der Koordinaten t_0 . Eine zweite Bedingung bewirkt die Erhaltung der Geschwindigkeit des Netzscherpunkts:

$$\Delta \mathbf{v}_M = \sum_{i=1}^n \mu_i \Delta \mathbf{v}_i = \mathbf{0}. \quad (4.75)$$

Werden die Gewichte μ_i als Massen interpretiert, so entspricht die Gleichung 4.75 physikalisch dem Impulserhaltungssatz (VOGEL 1997, GERSTL 1999).

b) *No-net-rotation* - Bedingung in Bezug auf einen Referenzkoordinatensatz

Als rotationsfrei gegenüber einem Referenznetz wird ein Netz an Stationskoordinaten dann bezeichnet, wenn es keine Rotation relativ zur Referenz ausführt. Der hier verwendete Begriff der *no-net-rotation* - Bedingung beinhaltet zusätzlich, dass das Netz zu einem bestimmten Zeitpunkt keine Orientierungsänderung gegenüber dem Referenznetz erfährt.

Die *no-net-rotation* - Bedingung bewirkt konkret, dass ein ausgeglichenes Netz an Stationen in Bezug auf das Netz der Näherungskordinaten keine Orientierungsänderung erfährt und nicht rotiert. Für die Stationspositionsvektoren zur Referenzepoche bedeutet das, dass die Korrekturen $\Delta \mathbf{r}_i$ keine Drehung des Netzes bewirken dürfen. Die Summe der Rotationsbewegungen $\mathbf{r}_i^0 \times \Delta \mathbf{r}_i$ über alle Stationen i muss also Null ergeben:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i \mathbf{r}_i^0 \times \Delta \mathbf{r}_i = \mathbf{0}. \quad (4.76)$$

Sind die Geschwindigkeiten der Stationsvektoren in der Lösung enthalten, müssen entsprechend auch die Rotationen zu Null werden. Es gilt:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i = \sum_{i=1}^n \mu_i \mathbf{r}_i^0 \times \mathbf{v}_i^0 = \text{const.} \quad (4.77)$$

Werden die Gewichte μ_i als Massen interpretiert, so entspricht die Gleichung 4.77 physikalisch dem Drehimpulserhaltungssatz (VOGEL 1997, GERSTL 1999).

Mit $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{0i} + \Delta \mathbf{r}_{0i}$ und $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{0i} + \Delta \mathbf{v}_{0i}$ ergibt sich (4.77) zu:

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i = \sum_{i=1}^n [(\mathbf{r}_i^0 \times \mathbf{v}_i^0) + (\Delta \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i^0) + (\mathbf{r}_i^0 \times \Delta \mathbf{v}_i) + (\Delta \mathbf{r}_i \times \Delta \mathbf{v}_i)]. \quad (4.78)$$

Aus 4.77 und 4.78 folgt die Bedingung:

$$\sum_{i=1}^n [(\Delta \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i^0) + (\mathbf{r}_i^0 \times \Delta \mathbf{v}_i) + (\Delta \mathbf{r}_i \times \Delta \mathbf{v}_i)] = \mathbf{0}. \quad (4.79)$$

Der quadratische Term $(\Delta \mathbf{r}_i \times \Delta \mathbf{v}_i)$ der nicht-linearen Bedingungsgleichung kann dann vernachlässigt werden, wenn die Näherungswerte hinreichend genau die geschätzten Werte approximieren.

4.2.9 Rekonstruktion freier Normalgleichungen

Die Kombination verschiedener Beobachtungsverfahren auf der Ebene von Normalgleichungen erfordert den Austausch von Normalgleichungssystemen zwischen Softwarepaketen und/oder Institutionen. Dafür wird im Allgemeinen das softwareunabhängige Format SINEX (engl.: *Software INdependent EXchange format*)¹ verwendet. Es ermöglicht sowohl den Austausch von Normalgleichungen als auch den von Lösungen. Die älteren Versionen des Formats (v. 1.00 und vorangegangene) waren nur für die Speicherung von Lösungsvektor und Kovarianzmatrix ausgelegt. Das hat zur Folge, dass von den meisten Institutionen auch heute noch Daten in Form von Lösungen zur Verfügung gestellt werden.

Für eine Kombination auf Normalgleichungsebene sind jedoch bedingungsfreie Normalgleichungen erforderlich. Für den Fall, dass die Lösung des Normalgleichungssystems im SINEX-Format vorliegt, muss die bedingungs-freie Normalgleichung rekonstruiert werden. Dafür müssen in der SINEX-Datei alle notwendigen Informationen angegeben sein: die Varianz-Kovarianzmatrix der geschätzten Parameter $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$, die aus den Pseudobeobachtungen berechnete Varianz-Kovarianzmatrix der Parameter $\mathbf{C}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}$, die Quadratsumme der Residuen $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$ und die geschätzte Varianz $\hat{\sigma}_0^2$.

¹Eine genaue Beschreibung des Formats befindet sich auf der Website <http://tau.fsg.tu-muenchen.de/~iers/web/sinex/format.php>

Die bedingungsfreie Normalgleichungsmatrix wird erhalten, indem die invertierte Varianz-Kovarianzmatrix der Pseudobeobachtungen von der invertierten Varianz-Kovarianzmatrix der Lösung abgezogen wird:

$$\mathbf{N} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}^{-1} - \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{C}_{\mathbf{xx}}^{-1}. \quad (4.80)$$

Die rechte Seite des Normalgleichungssystems kann unter Verwendung der Gleichungen 4.7 und 4.10 wie folgt rekonstruiert werden:

$$\mathbf{y} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}^{-1} \hat{\mathbf{x}}. \quad (4.81)$$

Die Quadratsumme $\mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$ wird aus der Gleichung 4.9 erhalten

$$\mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b} = \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}} + \mathbf{y}^T \hat{\mathbf{x}}. \quad (4.82)$$

4.3 Kombinationsmodelle für die Realisierung terrestrischer Referenzsysteme

In diesem Kapitel werden die beiden in dieser Arbeit verwendeten Modelle zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems vorgestellt. Sie unterscheiden sich durch die Berücksichtigung der zeitlichen Variation der Stationspositionen. Im ersten Modell gilt die Annahme, dass die Position einer Station eine lineare Funktion der Zeit ist und sich wie folgt beschreiben lässt:

$$x(t) = x(t_0) + \frac{dx}{dt}(t - t_0). \quad (4.83)$$

Dabei ist $x(t)$ die Position der Station zum Zeitpunkt t , $x(t_0)$ die Position der Station zur Referenzepeche t_0 und $\frac{dx}{dt} = \dot{x}$ die Geschwindigkeit der Station. Stationspositionen unterliegen jedoch nicht nur einer linearen Bewegung sondern periodischen und nicht-periodischen Variationen. Da der zeitlich lineare Term aber den Hauptanteil der Stationsbewegung beschreibt, ist dieser Ansatz für viele Anwendungen ausreichend. So wurden in allen bisherigen ITRF-Lösungen die Stationsbewegungen in dieser Weise parametrisiert. Die obere Graphik in Abbildung 4.2 zeigt vereinfacht diese Parametrisierung am Beispiel einer Komponente einer Stationsposition, von der angenommen wird, dass sie einer saisonalen Variation unterliegt. Die Parametrisierung der saisonalen Stationsbewegung ist bisher in der Realisierung terrestrischer Referenzsysteme nicht umgesetzt worden. Der für diese Arbeit zur Verfügung stehende Datensatz überdeckt einen zu kurzen Zeitraum, als dass eine Schätzung jahreszeitlicher Variationen der Stationspositionen sinnvoll wäre. In Kapitel 5.5 wird diese Möglichkeit aber noch einmal diskutiert.

Im zweiten Modell wird nicht ein Referenzrahmen aus den Beobachtungen des gesamten Zeitintervalls, sondern ein Referenzrahmen für jeden Tag i ($i=1, \dots, n$; n =Anzahl der Tage) berechnet. Dabei wird angenommen, dass die Stationspositionen \mathbf{x}_i über einen Tag konstant sind. Somit ist jeder einzelne der Referenzrahmen zeitunabhängig. Mit diesem Modell können bei Betrachtung einer Zeitreihe von Epochenreferenzrahmen alle zeitlich-variablen Effekte der Stationspositionen ab einer Länge von einem Tag berücksichtigt werden (siehe Abbildung 4.2 untere Graphik).

Das erste Modell hat den Vorteil, dass aus einer Vielzahl an Beobachtungen eine mittlere Position und eine Geschwindigkeit für jede Station mit einer sehr hohen rechnerischen Genauigkeit geschätzt werden. Die Zeitreihen der EOP werden mit dem Referenzrahmen in einer gemeinsamen Ausgleichung geschätzt, so dass Konsistenz zwischen dem Referenzrahmen und den EOP über den gesamten Beobachtungszeitraum gewährleistet ist. Die zusätzlich zu einer linearen Bewegung auftretenden Variationen der Stationspositionen werden jedoch als Fehler der Beobachtungen betrachtet und können, da sie ein systematisches Verhalten zeigen, die geschätzten Parameter verfälschen. Die Geometrie des Referenzrahmens zu einer bestimmten Epoche entspricht nicht der wahren Geometrie des globalen Stationsnetzes zu diesem Zeitpunkt, sondern einer mittleren, zeitlich-linear veränderlichen Geometrie. Folglich werden auch die EOP zu dieser Epoche als Rotationsparameter eines mittleren Netzes erhalten und entsprechen nicht den tatsächlichen.

Der zweite Ansatz ermöglicht hingegen die Darstellung der wahren Geometrie des Stationsnetzes und der EOP zu jeder Epoche. Jedoch ist die rechnerische Genauigkeit der Parameter im Vergleich zum ersten Modell geringer, da die Stationspositionen und EOP aus einem im Vergleich sehr kleinen Datenumfang geschätzt werden. Erfolgt die

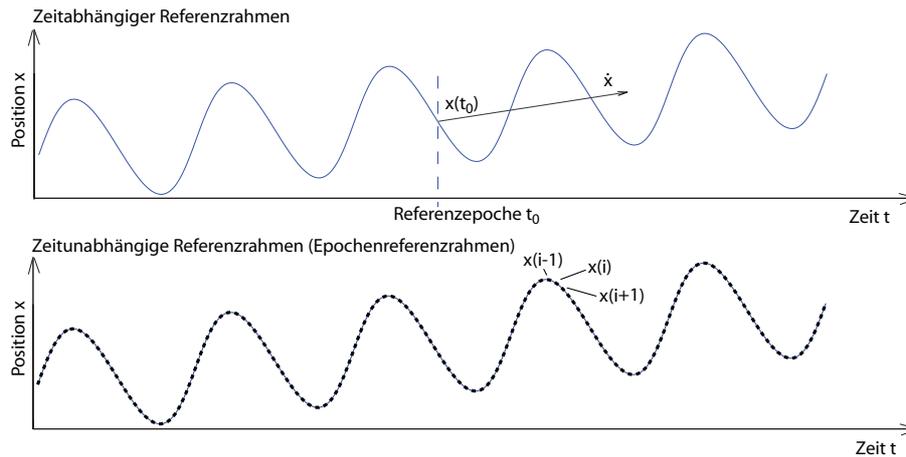


Abbildung 4.2: Vereinfachte Darstellung der Parametrisierung eines zeitabhängigen (oben) und eines zeitunabhängigen Referenzrahmens (unten) am Beispiel einer Stationsposition mit saisonaler Variation.

Berechnung aller täglichen Referenzrahmen auf dieselbe Weise, so können die Zeitreihen von Stationspositionen und EOP als konsistent angesehen werden. Dennoch kann keine vergleichbar hohe Konsistenz wie durch das erste Modell erreicht werden, da beispielsweise Änderungen in der Netzgeometrie von Tag zu Tag zu Unterschieden in der Realisierung des geodätischen Datums führen können.

Der Vergleich beider Modelle zeigt die jeweiligen Vorteile der Realisierungen. Während der zeitabhängige Referenzrahmen eine hohe Genauigkeit und Konsistenz der geschätzten Parameter gewährleistet, ist der Informationsgehalt über die zeitliche Variabilität der Parameter im Falle einer Zeitreihe täglicher Referenzrahmen sehr viel höher. Der höhere Informationsgehalt schlägt sich auch in der Anzahl der zu schätzenden Parameter nieder. Werden einmal nur die Stationskoordinaten betrachtet, so werden für den zeitabhängigen Referenzrahmen sechs Koordinaten je Station geschätzt. Eine Zeitreihe zeitunabhängiger Referenzrahmen umfasst hingegen insgesamt wesentlich mehr Parameter: drei Koordinaten je Station und Tag multipliziert mit der Anzahl der Epochenreferenzrahmen.

4.3.1 Kombinationsmodell für eine zeitabhängige Realisierung

Das Kombinationsmodell für die Realisierung eines zeitabhängigen Referenzrahmens basiert auf der Analyse und Kombination täglicher oder wöchentlicher bedingungsfreier Normalgleichungen, die das Ergebnis der Auswertung der Beobachtungen der einzelnen Verfahren sind. Sie werden zunächst für jedes Verfahren separat zu einer Normalgleichung kombiniert, die alle Beobachtungen dieses Verfahrens enthält. Anschließend erfolgt die Kombination dieser Normalgleichungen zu einer TRF-Lösung.

Das Kombinationsmodell umfasst die folgenden Arbeitsschritte:

Kombination eines zeitabhängigen Referenzrahmens je Beobachtungsverfahren

- Rekonstruktion der freien Normalgleichungen aus den SINEX-Dateien
- Analyse und Kombination der Normalgleichungen

Kombination der verschiedenen Beobachtungsverfahren

- Bestimmung der Varianzkomponenten
- Auswahl der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren
- Gleichsetzen von Stationsgeschwindigkeiten
- Festlegung des geodätischen Datums.

Eine schematische Darstellung des Kombinationsmodells gibt die Abbildung 4.3. Im Folgenden soll das Vorgehen in den einzelnen Schritten näher erläutert werden.

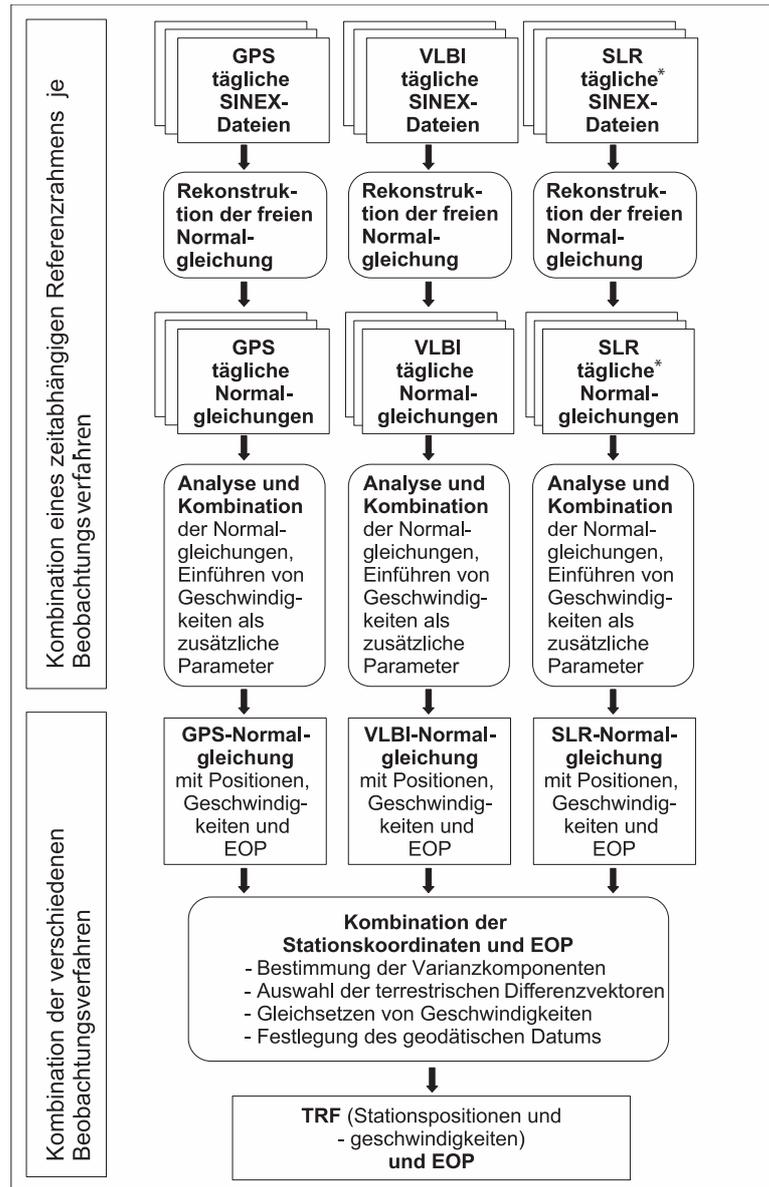


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des Kombinationsmodells für die Berechnung eines zeitabhängigen TRF. (* In dieser Arbeit stehen für SLR wöchentliche anstelle täglicher Normalgleichungen zur Verfügung.)

4.3.1.1 Rekonstruktion der freien Normalgleichungen aus den SINEX-Dateien

Die Eingangsdaten für die Berechnung terrestrischer Referenzrahmen werden von den internationalen Diensten der jeweiligen Beobachtungsverfahren im SINEX-Datei-Format zur Verfügung gestellt. Dieses Format lässt sowohl die vollständige Beschreibung der Lösung eines Ausgleichsproblems als auch die einer Normalgleichung zu. Von der Mehrzahl der Analysezentren werden die Daten als Lösung bereitgestellt. Zur Festlegung der geodätischen Datumparameter, die nicht aus den Beobachtungen selbst bestimmt werden können, werden Bedingungen in Form von Pseudobeobachtungen verwendet, die in der SINEX-Datei verbucht werden. Für die Kombination bedingungsfreier Normalgleichungen müssen diese aus den vorhandenen Lösungen rekonstruiert werden. Dies geschieht durch Inversion der Varianz-Kovarianzmatrix und Subtraktion der in der SINEX-Datei gespeicherten Bedingungen. Um eine bedingungsfreie Normalgleichung rekonstruieren zu können, müssen daher alle zur Lösung verwendeten Bedingungen in der SINEX-Datei angegeben werden. Als besonders kritisch sind Bedingungen anzusehen, die zur Stabilisierung der Lösung verwendet werden und sich auf reduzierte und in der SINEX-Datei nicht mehr enthaltene Parameter beziehen. Diese werden in der SINEX-Datei nicht verbucht und können nicht von der Normalgleichung subtrahiert werden. Sie werden auch als *versteckte Bedingungen* (engl.: *hidden constraints*) bezeichnet (DREWES und ANGERMANN 2003). Die bedingungsfreie Normalgleichung ist im

Fälle des Vorhandenseins solcher *versteckter Bedingungen* nicht vollständig rekonstruierbar. Dies kann einerseits dazu führen, dass die aus den Normalgleichungen berechnete Kombinationslösung systematische Fehler aufweist, andererseits können, wegen der Korrelationen zwischen reduzierten und verbleibenden Parametern, weitere für die Kombinationslösung eingeführte Pseudobebachtungen zusammen mit den *versteckten Bedingungen* eine Deformation der Lösung bewirken. Die vollständige Angabe aller verwendeten Bedingungen ist daher für die Kombination freier Normalgleichungen eine notwendige Voraussetzung. Die Formeln zur Rekonstruktion der freien Normalgleichungen sind in Kapitel 4.2.9 angegeben. Eine Möglichkeit, die rekonstruierten Normalgleichungen auf noch vorhandene Bedingungen hin zu überprüfen, bietet die sogenannte Rangdefektanalyse. Dabei kann festgestellt werden, ob die Normalgleichung die erwartete Singularität bezüglich bestimmter Datumparameter aufweist oder ob und wie stark diese durch noch vorhandene Bedingungen festgelegt sind (MEISEL *et al.* 2005).

4.3.1.2 Analyse und Kombination der Normalgleichungen

Zunächst werden die täglichen (oder wöchentlichen) Normalgleichungen je Beobachtungsverfahren kombiniert und dabei die Stationsgeschwindigkeiten als zusätzliche Parameter eingeführt. Nach der Addition geeigneter Datumbedingungen (vergl. Kapitel 4.2.8) werden die Normalgleichungen gelöst und eine zeitabhängige Lösung je Beobachtungstyp erhalten. Ebenso werden auch die täglichen Normalgleichungen unter Verwendung geeigneter Datumbedingungen gelöst und mittels einer 7-Parameter-Ähnlichkeitstransformation auf die jeweilige zeitabhängige Lösung transformiert. Die resultierenden Residuenzeitreihen der Stationspositionen werden im Hinblick auf Unstetigkeiten und Ausreißer analysiert. Anschließend erfolgt eine erneute Kombination der täglichen Normalgleichungen, eine Berechnung der Residuenzeitreihen unter Berücksichtigung der Unstetigkeiten und Ausreißer und anschließend eine nochmalige Zeitreihenanalyse. Eine Unstetigkeit in der Zeitreihe einer Station wird berücksichtigt, indem für die Zeit nach der Diskontinuität eine neue Position und eine neue Geschwindigkeit angesetzt werden. Ausreißer werden berücksichtigt, indem die Koordinaten der betreffenden Station aus der entsprechenden Tagesnormalgleichung reduziert werden. Die Reduktion von Parametern ist in Kapitel 4.2.7 beschrieben. Die reduzierten Koordinaten stehen für die Kombination nicht mehr zur Verfügung. Der Vorgang der Detektion und Berücksichtigung von Unstetigkeiten und Ausreißern wird so lange iteriert, bis keine solchen mehr identifiziert werden können.

4.3.1.3 Bestimmung der Varianzkomponenten

Für eine Kombination der heterogenen Beobachtungsdaten verschiedener Raumbeobachtungsverfahren müssen Varianzkomponenten zur Beschreibung der Genauigkeitsverhältnisse zwischen den Beobachtungsverfahren bestimmt werden, da im verwendeten Ausgleichungsansatz zunächst nur ein globaler Parameter des stochastischen Modells, der Varianzfaktor der Gewichtseinheit, geschätzt wird. Eine Möglichkeit der Berücksichtigung relativer Unterschiede in den Varianzniveaus besteht darin, Varianzkomponenten direkt in der Ausgleichung zu schätzen (Varianzkomponentenschätzung) (KOCH 1999). Diese Methode wurde am DGFI implementiert und für die Anwendung in der Kombination verschiedener Raumbeobachtungsverfahren getestet (KELM 2003). Dabei erwiesen sich jedoch die geringe Anzahl an Ko-lokationsstationen und die teilweise systematischen Differenzen zwischen den terrestrischen Differenzvektoren und den Beobachtungen der Raumbeobachtungsverfahren als problematisch. Ein weiteres Problem ist, dass durch Fehler im stochastischen Modell eines Beobachtungsverfahrens die geschätzten Varianzen möglicherweise nicht die tatsächliche Genauigkeit der Parameter widerspiegeln. Insbesondere bei GPS sind die Varianzen der Parameter wegen der Nichtberücksichtigung von Korrelationen zwischen den Beobachtungen systematisch zu klein (SIEG und HIRSCH 2000, SCHÖN und KUTTERER 2006). Dieser Fehler kann nicht durch das Schätzen einer Varianz der GPS-Beobachtungen in der Ausgleichung behoben werden.

Um die genannten Probleme zu umgehen, werden die Varianzkomponenten in der vorliegenden Arbeit empirisch unter Verwendung von aus den Stationspositionszeitreihen abgeleiteten realistischen Genauigkeitsmaßen bestimmt. Es wird zunächst für ausgewählte Stationen die Genauigkeit geschätzt, mit der die mittlere Position aus den Zeitreihen abgeleitet werden kann. Zur Beschreibung der Genauigkeit der einzelnen Stationsposition wird die tägliche Wiederholgenauigkeit (RMS), im Folgenden auch Wiederholbarkeit genannt, gewählt. Danach werden die Wiederholbarkeiten der einzelnen Komponenten (Δx , Δy , Δz) aus den jeweiligen Zeitreihen bestimmt. Aus diesen wird anschließend die Wiederholbarkeit der Position berechnet:

$$\text{RMS} = \sqrt{\text{RMS}_{\Delta x}^2 + \text{RMS}_{\Delta y}^2 + \text{RMS}_{\Delta z}^2}. \quad (4.84)$$

Mit

$$\text{RMS}_{\Delta x} = \sqrt{\frac{\Delta x_{t_1}^2 + \Delta x_{t_2}^2 + \dots + \Delta x_{t_n}^2}{n}} \quad \text{für Epochen } t_1 \text{ bis } t_n \quad (4.85)$$

$$\text{RMS}_{\Delta y} = \sqrt{\frac{\Delta y_{t_1}^2 + \Delta y_{t_2}^2 + \dots + \Delta y_{t_n}^2}{n}} \quad (4.86)$$

$$\text{RMS}_{\Delta z} = \sqrt{\frac{\Delta z_{t_1}^2 + \Delta z_{t_2}^2 + \dots + \Delta z_{t_n}^2}{n}}. \quad (4.87)$$

Für die Genauigkeit der aus der Zeitreihe zur Mitte des Intervalls $t_1 - t_n$ geschätzten Position σ_{ZR} , ergibt sich damit:

$$\sigma_{\text{ZR}} = \frac{\text{RMS}}{\sqrt{n}}. \quad (4.88)$$

Aus den Lösungen werden für einen Satz ausgewählter Stationen je Raumbeobachtungsverfahren die Standardabweichungen gemittelt. Die Gleichung für die Bestimmung der Varianzkomponenten resultiert aus der Forderung, dass die aus der Kombinationslösung geschätzten mittleren Standardabweichungen der Stationspositionen zweier Beobachtungsverfahren, ($\bar{\sigma}_{\text{COV}_1}$ und $\bar{\sigma}_{\text{COV}_2}$) im gleichen Verhältnis zueinander stehen sollen, wie die aus den Zeitreihen bestimmten mittleren Standardabweichungen ($\bar{\sigma}_{\text{ZR}_1}$ und $\bar{\sigma}_{\text{ZR}_2}$):

$$\frac{\bar{\sigma}_{\text{COV}_1}}{\bar{\sigma}_{\text{COV}_2}} = \frac{\bar{\sigma}_{\text{ZR}_1}}{\bar{\sigma}_{\text{ZR}_2}} \quad (4.89)$$

Zur Berechnung der relativen Gewichte wird die Varianzkomponente eines Beobachtungsverfahrens auf 1.0 festgesetzt und die Varianzkomponenten der anderen Verfahren relativ zu diesem bestimmt. Die Varianzkomponente σ^2 des zweiten Verfahrens ergibt sich damit aus

$$\sigma_2^2 = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad \text{mit:} \quad a = \frac{\bar{\sigma}_{\text{ZR}_1}}{\bar{\sigma}_{\text{ZR}_2}}, \quad b = \frac{\bar{\sigma}_{\text{COV}_1}}{\bar{\sigma}_{\text{COV}_2}} \quad (4.90)$$

Die Reziprokwerte der berechneten Varianzkomponenten werden bei der Kombination (vergl. Kapitel 4.2.2) als Gewichtungsfaktoren des jeweiligen Verfahrens eingeführt.

Die Kombinationslösung, die unter Verwendung der Varianzkomponenten berechnet wurde, erfüllt meist die Bedingung 4.89 noch nicht, so dass die Bestimmung der Varianzkomponenten iterativ erfolgen muss.

4.3.1.4 Auswahl terrestrisch bestimmter Differenzvektoren

Beobachtungen verschiedener geodätischer Raumbeobachtungsverfahren beziehen sich in aller Regel nicht auf dieselben Referenzpunkte. Zur Kombination der Stationspositionen werden deshalb gemessene Differenzvektoren zwischen benachbarten Instrumenten verschiedener Raumbeobachtungsverfahren benötigt.

Ein Problem bei der Kombination stellen die Diskrepanzen dar, die zwischen den terrestrischen Differenzvektoren und den aus den Beobachtungen der Raumbeobachtungsverfahren geschätzten Koordinatendifferenzen auftreten. Sie erreichen für gute Ko-lokationsstationen Werte von weniger als 5 mm, für die meisten der Stationen aber Werte zwischen 5 mm und 20 mm. Die Auswahl der terrestrischen Messungen, die in der Kombination verwendet werden sollen, ist somit maßgebend für die Genauigkeit und die Konsistenz des kombinierten Netzes. Die Ursachen für die auftretenden Diskrepanzen sind vielfältig. Zum einen können die Korrekturmodelle, die bei der Analyse der Raumbeobachtungsverfahren Anwendung finden, Systematiken aufweisen, die zu Abweichungen der geschätzten Position des Referenzpunkts von der tatsächlichen führen. So wird beispielsweise von KRÜGEL *et al.* (2007) gezeigt, dass sich durch die Auswertung der GPS-Beobachtungen mit absoluten statt mit relativen Phasenzentrumskorrekturen und der Verwendung verbesserter Achsenoffsets für die VLBI-Antennen die Diskrepanzen zwischen den terrestrischen Differenzvektoren und den Lösungen der Raumbeobachtungsverfahren signifikant verringern. Andererseits können auch systematische Fehler in den terrestrischen Messungen selbst oder bei der Transformation der lokalen Netze in einen globalen Referenzrahmen auftreten. Diese Probleme werden in Kapitel 5.2.3.1 noch diskutiert. Die unterschiedliche Bewegung benachbarter Instrumente kann eine

weitere Ursache für Diskrepanzen zwischen dem terrestrischen und dem aus den Raumbereobachtungsverfahren bestimmten Differenzvektor sein, wenn diese nicht zur Beobachtungsepoche der terrestrischen Messung verglichen werden. Infolge der Vielzahl möglicher Ursachen ist eine Interpretation der Differenzen sehr schwierig.

In Kapitel 5.1.2 wird aufgezeigt, dass die für die terrestrischen Differenzvektoren veröffentlichten Standardabweichungen zu einem großen Teil unrealistisch sind und nicht bei der Kombination verwendet werden dürfen. Deshalb müssen die Standardabweichungen der Differenzvektoren empirisch bestimmt werden.

Eine Frage, die sich in diesem Zusammenhang stellt, ist, ob die in der Kombination verwendeten terrestrischen Messungen die innere Geometrie der Netze der Raumbereobachtungsverfahren verändern dürfen oder nicht. Die Antwort muss sein, dass durch die Kombination keine Veränderung der inneren Geometrie der Netze erfolgen darf. Ist beispielsweise die Position einer GPS-Station aufgrund der Verwendung eines nichtkalibrierten Radoms systematisch verfälscht, so würde ein fehlerfreier und mit kleiner Standardabweichung eingeführter terrestrischer Differenzvektor zu einer SLR-Station bewirken, dass nicht die fehlerhafte Position der GPS-Station korrigiert, sondern die im Allgemeinen mit geringerer Genauigkeit bestimmte Position der SLR-Station ebenfalls systematisch verfälscht wird. Infolge der Korrelationen zwischen den Stationskoordinaten würden dann auch die Koordinaten der übrigen SLR-Stationen systematisch verändert. Aber selbst wenn in der Kombination eine systematisch verfälschte Position korrigiert würde, so würden aufgrund der Korrelationen auch die benachbarten Stationen systematisch um einen Anteil der Korrektur verschoben. Zudem können auch die terrestrischen Messungen selbst fehlerbehaftet sein und in der Kombination die Genauigkeit der Raumbereobachtungsverfahren dezimieren. Das Ziel der Kombination sollte also sein, die Geometrie der Stationsnetze und damit deren innere Genauigkeit zu erhalten. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, die Standardabweichungen, die für die Gewichtung der terrestrischen Differenzvektoren in der Kombination verwendet werden, empirisch durch Vergleich der Differenzvektoren mit den Lösungen der Raumbereobachtungsverfahren festzulegen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Ziel der Kombination ist es, eine hohe Konsistenz und eine möglichst geringe Deformation der kombinierten Netze zu erreichen. Die Kombinationsergebnisse wurden wie folgt auf die beiden genannten Kriterien hin untersucht:

- Unter der Voraussetzung, dass keine systematischen Unterschiede zwischen den EOP, die aus den Beobachtungen der verschiedenen Raumbereobachtungsverfahren geschätzt werden, bestehen (dies kann weitgehend vorausgesetzt werden, wenn die Modelle und Parametrisierungen der Beobachtungsverfahren angeglichen wurden), können die Polkoordinaten zur Beurteilung der Konsistenz herangezogen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden dabei zunächst die Stationsnetze der Raumbereobachtungsverfahren kombiniert, nicht aber die zugehörigen EOP-Reihen. Diese werden getrennt voneinander in der Kombination mit ausgeglichen. Die aus der Kombination resultierenden Polkoordinatenzeitreihen der verschiedenen Raumbereobachtungsverfahren werden daraufhin auf systematische Unterschiede untersucht. Weisen die Zeitreihen eine mittlere Differenz auf, so muss davon ausgegangen werden, dass die ausgewählten Differenzvektoren eine systematische Verdrehung der Stationsnetze gegeneinander bewirken, also eine mangelnde Konsistenz des kombinierten Netzes vorliegt. Die Zielsetzung ist somit, die systematischen Unterschiede zu minimieren.

Zur Beurteilung der Konsistenz könnten auch andere Parameter herangezogen werden. Die Polkoordinaten sind jedoch in ihrer Eigenschaft als globale Parameter, die aus den Beobachtungen jedes der Verfahren bestimmt werden können, zur Beurteilung der Konsistenz am besten geeignet.

- Als Maß für die Deformation des Stationsnetzes eines Beobachtungsverfahrens durch die Kombination wird das mittlere quadratische Residuum der Stationspositionen herangezogen, das aus der Transformation der kombinierten Lösung auf die Lösung des jeweiligen Beobachtungsverfahrens erhalten wird. Das Ziel ist es, die Deformation der Netze durch die Kombination zu minimieren.

Die Auswahl der Differenzvektoren erfolgt, indem zunächst mehrere Gruppen von Vektoren definiert und diese bezüglich der genannten Kriterien untersucht und verglichen werden. Der Satz an Differenzvektoren, der die kleinsten Differenzen zwischen den Polkoordinatenzeitreihen und die geringste Netzdeformation hervorruft, wird für die Kombination ausgewählt.

4.3.1.5 Gleichsetzen von Geschwindigkeiten

Unter dem Begriff *Gleichsetzen von Geschwindigkeiten* wird verstanden, dass die Geschwindigkeiten zweier Stationen durch das Einführen einer Pseudobereobachtung der Form $\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2 = \mathbf{0}$ kombiniert werden. Im Vergleich

zur Kombination der Geschwindigkeiten durch Addition der Parameter hat diese Vorgehensweise den Vorteil, dass für jede Station separat eine Geschwindigkeit geschätzt wird.

Nahe beieinander liegende Stationen weisen oft dieselbe Geschwindigkeit auf. Bevor die Geschwindigkeiten gleichgesetzt werden können, muss dennoch zunächst geprüft werden, ob keine signifikanten Differenzen zwischen diesen bestehen. Ursache für signifikante Unterschiede können beispielsweise Instabilitäten im geologischen Untergrund der Stationen sein. Zudem können bei nicht-linearer Bewegung der Stationen unterschiedliche Beobachtungszeiträume oder die unterschiedliche Verteilung der Beobachtungen im Beobachtungszeitraum zu Differenzen in den geschätzten Geschwindigkeiten führen.

Für die Prüfung der Geschwindigkeitsdifferenzen auf Nichtsignifikanz wird als statistische Testgröße das Verhältnis zwischen Geschwindigkeitsdifferenz und deren Standardabweichung gewählt. Für eine sehr kleine Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 0.05% ergibt sich unter Annahme einer Student-t-Verteilung ein Quantilwert von rund 3.0 (KOCH 1997). Eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen benachbarten Stationen wird somit als nicht-signifikant angesehen, wenn sie kleiner oder gleich ihrem dreifachen mittleren Fehler ist. Alle Geschwindigkeiten benachbarter Stationen, die keine signifikanten Differenzen aufweisen, werden in der Kombination gleichgesetzt.

4.3.1.6 Festlegung des geodätischen Datums

Aus den Beobachtungen der verschiedenen Raumb Beobachtungsverfahren können bestimmte Parameter des geodätischen Datums direkt und ohne das Einführen zusätzlicher Bedingungen festgelegt werden. In Kapitel 2.1 wurden bereits die Festlegung der Datumparameter *Koordinatenursprung* und *Maßstab* aus den Raumb Beobachtungsverfahren diskutiert. Das aus den Beobachtungen realisierte geodätische Datum ist wegen der Fehler der Beobachtungen und der Reduktionsmodelle ebenfalls fehlerbehaftet. Somit unterscheiden sich die Lösungen der einzelnen Verfahren möglicherweise bezüglich ihres geodätischen Datums.

Es wird geprüft, ob die Festlegung des Koordinatenursprungs aus SLR- und GPS-Beobachtungen konsistent möglich ist, indem die zeitlichen Variationen der Translationen der Stationsnetze gegenüber dem Koordinatenursprung analysiert und verglichen werden. Wenn möglich, werden beide Verfahren zur Festlegung des Koordinatenursprungs verwendet.

Der Maßstab der kombinierten Lösung wird, wenn möglich, aus den Beobachtungen aller drei Verfahren festgelegt. Dafür wird zunächst geprüft, ob die Lösungen der einzelnen Beobachtungsverfahren bezüglich ihres Maßstabs konsistent sind.

Die Festlegung der Orientierung erfolgt entsprechend den Konventionen für die Realisierung des ITRS. Das Stationskoordinatennetz wird unter Verwendung von Minimumsbedingungen so gelagert, dass es zum Referenzzeitpunkt die gleiche Orientierung wie der ITRF2005 aufweist. Die Geschwindigkeiten werden ebenso mittels Minimumsbedingungen auf den Geschwindigkeiten des ITRF2005 gelagert, so dass das Stationskoordinatennetz keine Rotation bezüglich des ITRF2005 erfährt. Die Beschreibung der notwendigen Minimumsbedingungen erfolgte in Kapitel 4.2.8(b). Das ausgeglichene Netz erfüllt nur näherungsweise die NNR-Bedingung, da, wie DREWES und ANGERMANN (2001) zeigen, der ITRF2000 und damit auch die folgenden ITRF-Realisierungen eine Restrotation des Netzes aufweisen. Die Ursachen dafür sind zum einen, dass das Modell NNR-NUVEL-1A selbst eine Rotation gegenüber der festen Erdkruste aufweist, zum anderen werden bei der Umsetzung der NNR-Bedingung durch Lagerung auf vorangegangene ITRF-Lösungen mögliche Unzulänglichkeiten einer Lösung auf die späteren übertragen.

Eine Möglichkeit, einen TRF zu realisieren, dessen Stationsgeschwindigkeiten keine gemeinsame Rotation aufweisen, besteht darin, die NNR-Bedingung aus den geodätischen Beobachtungen selbst abzuleiten, wie es von DREWES und MEISEL (2003) zur Berechnung des plattenkinematischen Modells *Actual Plate Kinematic and deformation Model* (APKIM) umgesetzt wurde. Um jedoch die Konsistenz der Lösung zum ITRF2005 und damit auch die Vergleichbarkeit der geschätzten EOP mit der an den ITRF2005 angepassten EOP-Reihe des IERS IERS EOP 05 C04 (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>) zu gewährleisten, werden die Orientierung und ihre zeitliche Änderung so festgelegt, dass sie mit dem Datum des ITRF2005 konsistent sind.

Das geodätische Datum wird durch die geschätzten Parameter (insbesondere Stationskoordinaten, Polkoordinaten und UT1-UTC) repräsentiert. Die Konsistenz der verschiedenen Netzteile des Referenzrahmens bezüglich des geodätischen Datums wird deshalb nur durch die Kombination dieser Parameter erreicht. Während die Kombination der Stationspositionen die konsistente Realisierung des Koordinatenursprungs, der Orientierung und des Maßstabs ermöglicht, wird die einheitliche Realisierung der zeitlich-linearen Änderung dieser Datumparameter durch die Kombination der Geschwindigkeiten erreicht. Die Kombination der Polkoordinaten und der UT1-UTC-Parameter erlaubt ebenfalls die konsistente Realisierung der Orientierung und deren zeitlicher Variation.

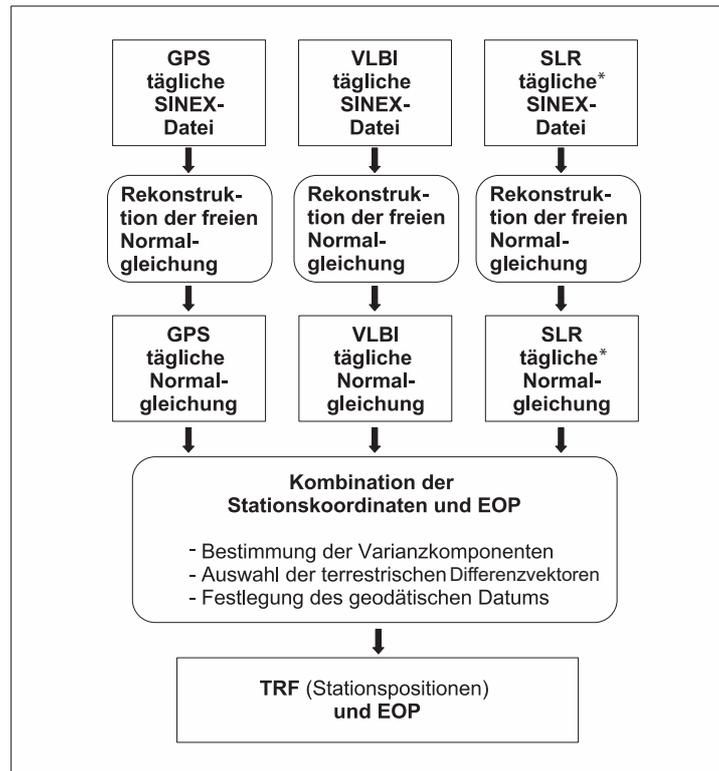


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Kombinationsmodells zur Berechnung eines zeitunabhängigen TRF. (* In dieser Arbeit stehen für SLR nur wöchentliche anstelle täglicher Normalgleichungen zur Verfügung.)

Während bei der Kombination der Stationspositionen zusätzlich Differenzvektoren eingeführt werden müssen, können die EOP direkt kombiniert werden. Sie eignen sich daher sehr gut zur Validierung der Differenzvektoren (vergl. Kapitel 4.3.1.4).

4.3.2 Kombinationsmodell für eine zeitunabhängige Realisierung

Das Kombinationsmodell für die Realisierung eines zeitunabhängigen Referenzrahmens basiert auf der Kombination von Normalgleichungen verschiedener Raumbeobachtungsverfahren, in die nur Beobachtungen aus einem kurzen Beobachtungszeitraum eingehen, für den die Stationsbewegung vernachlässigt werden kann. Für diese Arbeit stehen tägliche Normalgleichungen der Raumbeobachtungsverfahren zur Verfügung.

Das Kombinationsmodell für die Realisierung eines zeitunabhängigen TRF umfasst die folgenden Arbeitsschritte:

- Rekonstruktion der freien Normalgleichungen aus den SINEX-Dateien
- Bestimmung der Varianzkomponenten
- Auswahl der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren
- Festlegung des geodätischen Datums.

Eine schematische Darstellung des Kombinationsmodells gibt die Abbildung 4.4.

4.3.2.1 Rekonstruktion der freien Normalgleichungen aus den SINEX-Dateien

Die Rekonstruktion der freien Normalgleichungen aus den SINEX-Dateien erfolgt so, wie es in Kapitel 4.3.1 beschrieben wurde.

4.3.2.2 Bestimmung der Varianzkomponenten

Wie für die Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens müssen die Varianzkomponenten auch hier empirisch bestimmt werden (vergl. Kapitel 4.3.1.3), indem die täglichen Wiederholbarkeiten der Stationspositionen herangezogen werden. Für die Berechnung der Varianzkomponenten wird gefordert, dass die aus der Kombinationslösung geschätzten mittleren Standardabweichungen der Stationspositionen verschiedener Beobachtungsverfahren im gleichen Verhältnis zueinander stehen sollen, wie die aus den Positionszeitreihen berechneten täglichen Wiederholbarkeiten der entsprechenden Stationen. Sind $\overline{\text{RMS}}_1$ und $\overline{\text{RMS}}_2$ die mittleren Wiederholbarkeiten eines Satzes ausgewählter Stationen zweier Beobachtungsverfahren und $\bar{\sigma}_1$ und $\bar{\sigma}_2$ die mittleren Standardabweichungen aus der Lösung der Normalgleichungen, dann ergibt sich bei Festlegung des Varianzfaktors des ersten Beobachtungsverfahrens auf einen Wert von 1.0 der Varianzfaktor σ_2^2 des zweiten Beobachtungsverfahrens wie folgt:

$$\sigma_2^2 = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad \text{mit:} \quad a = \frac{\overline{\text{RMS}}_1}{\overline{\text{RMS}}_2}, \quad b = \frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2}. \quad (4.91)$$

Es wird je eine Varianzkomponente aus dem gesamten Beobachtungszeitraum bestimmt und in alle täglichen Kombinationen eingeführt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Varianzniveaus der täglichen Lösungen eines Beobachtungsverfahrens über den gesamten Zeitraum annähernd gleich sind.

4.3.2.3 Auswahl terrestrischer Differenzvektoren

Die Auswahl der terrestrischen Differenzvektoren für die Kombination täglicher Normalgleichungen erfolgt in ähnlicher Weise wie für den zeitabhängigen Referenzrahmen. Zunächst werden für jeden Tag die Lösungen der Raumbeobachtungsverfahren mit den terrestrischen Differenzvektoren verglichen. Basierend auf diesen Vergleichen werden für jeden Tag Gruppen terrestrischer Differenzvektoren bestimmt, die innerhalb bestimmter Grenzwerte mit den Lösungen der Raumbeobachtungsverfahren übereinstimmen. Für jeden der Grenzwerte werden dann alle Tageskombinationen unter Verwendung der jeweiligen Differenzvektoren berechnet. Um zu entscheiden, welcher Grenzwert für die Auswahl der Differenzvektoren geeignet ist, werden die Tageslösungen hinsichtlich ihrer Konsistenz und der durch die Kombination hervorgerufenen Deformation der Netze verglichen. Wie auch für die Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens in Kapitel 4.3.1.4 wird zur Quantifizierung der Konsistenz eine mittlere Differenz der Polkoordinaten und als Maß für die Deformation das mittlere Residuum der Stationspositionen aus der Transformation der kombinierten Lösungen auf die Lösungen der einzelnen Beobachtungsverfahren verwendet. Im Gegensatz zur Berechnung eines zeitabhängigen Referenzrahmens stehen für jede der Tageslösungen nur eine kleine Anzahl an Ko-lokationsstationen zur Verfügung. Um eine Lösung berechnen zu können, müssen mindestens drei Differenzvektoren eingeführt werden, da anderenfalls das kombinierte Netz einen Konfigurationsdefekt aufweist (NIEMEIER 2002). Die Anzahl der lösbaren Kombinationen hängt stark vom ausgewählten Grenzwert ab. Neben der Konsistenz der Lösungen und der minimalen Deformation der Netze wird deshalb die Anzahl der gelösten Tageskombinationen als drittes Kriterium für die Festlegung eines geeigneten Grenzwerts eingeführt.

4.3.2.4 Festlegung des geodätischen Datums

Die Festlegung des geodätischen Datums für den zeitunabhängigen Referenzrahmen erfolgt analog zu der des zeitabhängigen Referenzrahmens, die in Kapitel 4.3.1 beschrieben ist. Der Koordinatenursprung wird aus den SLR-Beobachtungen und gegebenenfalls aus den GPS-Beobachtungen realisiert. Der Maßstab des kombinierten Netzes wird aus den Beobachtungen aller eingehenden Verfahren bestimmt, sofern diese keine Maßstabsunterschiede aufweisen. Die Festlegung der Orientierung erfolgt mit Hilfe einer Minimumsbedingung so, dass sie identisch ist mit der Orientierung des ITRF2005 zur entsprechenden Epoche.

4.3.3 Umsetzung der Kombinationsmodelle

Die Umsetzung der Kombinationsmodelle erfolgt in Skripten unter Verwendung der Module der Software DOGS (**D**GFI **O**rbit and **G**eodetic **P**arameter **E**stimation **S**oftware), die am DGFI entwickelt wurde (<http://www.dgfi.badw.de/dgfi/ILRS-AC/dogs/>, 20.02.2008) (GERSTL *et al.* 2000). Die Mehrzahl der verwendeten Module sind Bestandteil der Unterbibliothek *Combination Software* (**DOGS-CS**), die speziell für die Kombination und Lösung großer Gleichungssysteme konzipiert wurde. Die ausführliche Beschreibung der mathematischen Grundlagen zu den in dieser Arbeit verwendeten Programmen gibt Kapitel 4.2.

5. Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems am Beispiel homogener prozessierter Beobachtungen

5.1 Beobachtungsdaten

5.1.1 GPS-, VLBI- und SLR-Beobachtungsdaten

Die Berechnungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit basieren auf täglichen Normalgleichungen, die das Resultat der Auswertung von Beobachtungen der geodätischen Raumberechnungsverfahren GPS, VLBI und SLR sind. Die Auswertung der GPS-Beobachtungen fand am Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungs-Zentrum (GFZ) mit einer modifizierten Version der Bernese GPS Software 5.0 statt (STEIGENBERGER *et al.* 2006(a), DACH *et al.* 2007). Sie erfolgte innerhalb eines Projekts, das sich mit der Neuprozessierung von 195 Stationen des globalen GPS-Stations-Netzes des Internationalen GPS Dienstes (engl.: *Internationalen GPS Service* (IGS)) befasst (STEIGENBERGER *et al.* 2006(a)). Ziel dieses Projekts ist es, das IGS-Netz über einen Zeitraum von elf Jahren und unter Verwendung aktueller Reduktionsmodelle konsistent auszuwerten. Damit soll gezeigt werden, mit welcher Genauigkeit geodätische Parameter aus den Beobachtungen eines globalen GPS-Netzes abgeleitet werden können. Die vom IGS bereitgestellten Lösungen sind wegen Änderungen in der Auswertestrategie nicht über den gesamten Zeitraum hinweg konsistent, wodurch die Genauigkeit der Parameter limitiert wird. Der IGS hat jedoch bereits mit der Neuprozessierung aller IGS-Beobachtungsdaten begonnen (STEIGENBERGER *et al.* 2006(b)). Für die vorliegende Arbeit wurden die aus der tageweisen GPS-Auswertung des GFZ resultierenden Normalgleichungen für zwei Jahre zur Verfügung gestellt. Die Daten überdecken die Zeiträume vom 03.09.2001 bis zum 31.10.2002 sowie vom 02.09.2004 bis zum 31.10.2005. Der Datensatz umfasst die Beobachtungen von insgesamt 187 Stationen. Die Konfiguration des GPS-Netzes ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Zeitbasis von insgesamt vier Jahren (2001 bis 2005) wurde gewählt, um realistische Geschwindigkeiten für die Stationskoordinaten aus den Beobachtungen ableiten zu können. Um die Auswirkung saisonaler Effekte auf die Ergebnisse zu reduzieren, wurden die Beobachtungen so ausgewählt, dass sie genau zwei Jahre überdecken. Die Beschränkung der Daten auf zwei Jahre wurde vorgenommen, um die Berechnung vieler verschiedener Lösungsvarianten möglich zu machen. Die Verwendung von mehr Beobachtungsdaten hätte eine sehr viel größere Rechenzeit erfordert und die Anzahl der Lösungen, die für diese Arbeit berechnet werden können, stark begrenzt.

Die Auswertung der VLBI-Beobachtungen erfolgte am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI) mit der Software OCCAM (TITOV *et al.* 2004) in der Version 6. Das DGFI hat sich als eines der Analysezentren (engl.: *Analysis Centers*) des Internationalen VLBI Dienstes (engl.: *Internationalen VLBI Service* (IVS)) zur routinemäßigen Auswertung der Beobachtungen des IVS-Stationsnetzes verpflichtet. Für den Zeitraum, in dem auch GPS-Normalgleichungen zur Verfügung standen, konnten insgesamt 326 VLBI-Sessions verwendet werden. Die Mehrzahl der Sessions sind die sogenannten R1- und R4-Sessions des IVS. Diese Sessions finden regelmäßig montags (R1) und donnerstags (R4) statt. Die R1- und R4-Sessions unterscheiden sich durch die Konfiguration des Stationsnetzes, aber auch innerhalb der R1- und R4-Sessions variiert die Netzkonfiguration (<http://lupus.gsfc.nasa.gov/sess>, 16.05.2008). Sessions, die nur die Beobachtungen einer Basislinie enthalten, und solche mit weniger als 80 Beobachtungen pro Station werden vom DGFI nicht prozessiert. Der Grund dafür ist die geringe Redundanz der Beobachtungen und die Notwendigkeit, zusätzliche Bedingungen einzuführen, um bei gleicher Parametrisierung ein Normalgleichungssystem lösen zu können, das aus den Beobachtungen nur einer Basislinie erzeugt ist (persönliche Mitteilung V. Tesmer, April 2008). Insgesamt gehen die Beobachtungen von 31 VLBI-Stationen in die Prozessierung ein. Das VLBI-Stationsnetz zeigt die Abbildung 5.1.

Die SLR-Beobachtungen wurden am GFZ ausgewertet. Das GFZ ist ein Analysezentrum des Internationalen SLR Dienstes (engl.: *Internationalen Laser Ranging Service* (ILRS)) und hat als solches die Aufgabe, SLR-Beobachtungen des globalen Stationsnetzes des ILRS auszuwerten. Die SLR-Beobachtungen einer Woche werden gemeinsam analysiert und als Wochenlösungen oder -normalgleichungen zur Verfügung gestellt. Die Auswertung erfolgt mit der Software EPOS (Earth Parameter & Orbit determination System). Es wurden die Beobachtungen von 43 SLR-Stationen prozessiert. Das SLR-Stationsnetz ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Die Bereitstellung der Auswerteergebnisse aller drei Verfahren durch DGFI und GFZ erfolgte einheitlich im SINEX-Format.

Um eine konsistente Auswertung der Beobachtungen der verschiedenen Raumberechnungsverfahren zu gewährleisten, wurden die genannten Softwarepakete dahingehend angepasst, dass die gleichen Modelle und die gleiche Parametrisierung für die Auswertung aller Beobachtungsdaten verwendet werden konnten. Die Tabelle 1 im Anhang gibt eine Übersicht über die verwendeten Modelle, die für die gemeinsamen Parameter relevant sind. Darin sind auch die Kapitel dieser Arbeit angegeben, in denen die verfügbaren Modelle beschrieben werden.

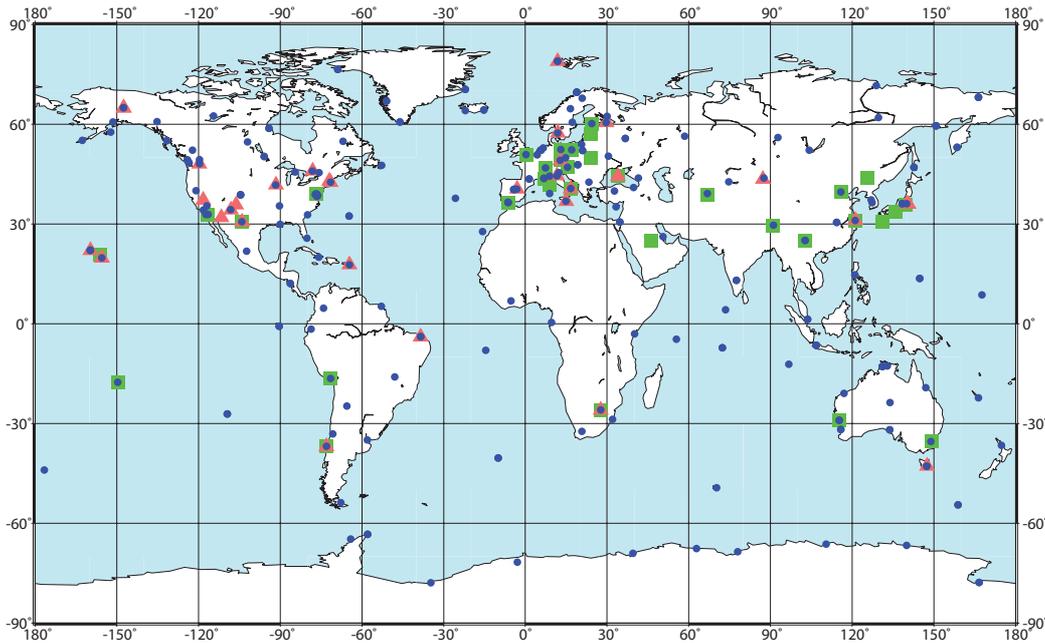


Abbildung 5.1: Stationen des GPS-Netzes (blaue Punkte), des VLBI-Netzes (rote Dreiecke) und des SLR-Netzes (grüne Quadrate).

Zwei Anmerkungen bezüglich der verwendeten Modelle sind notwendig: In Kapitel 3.1.2.1 wurde gezeigt, dass die Übertragungsfunktionen für die Umrechnung der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung durch Verwendung von Daten aus numerischen Wettermodellen verbessert werden konnten. Die Beobachtungsdaten von VLBI und GPS, die in dieser Arbeit verwendet werden, wurden dennoch mit der Übertragungsfunktion NMF berechnet. Der Grund ist, dass die Übertragungsfunktion IMF noch nicht in beide Softwarepakete OCCAM und Bernese GPS Software implementiert war. Da aber für GPS und VLBI dieselbe Übertragungsfunktion verwendet wurde, wirken sich die Unzulänglichkeiten der Übertragungsfunktion nicht auf Koordinatendifferenzen zwischen Stationen beider Verfahren aus. Für die Darstellung der Gradienten muss festgestellt werden, dass im Falle von VLBI die von MACMILLAN (1995) publizierte, im Falle von GPS jedoch die Übertragungsfunktion, die in DACH *et al.* (2007) beschrieben ist, verwendet wurde. Diese Inkonsistenz wurde aber erst nach der Bereitstellung der Auswertergebnisse bekannt. Der Effekt auf die Stationskoordinaten liegt bei maximal 0.5 mm (persönliche Kommunikation mit V. Tesmer und P. Steigenberger, 2007).

Für die gemeinsamen Parameter wurde jeweils eine einheitliche geometrische Darstellung und zeitliche Auflösung gewählt. Alle geschätzten Parameter sind zeitabhängig. Diese Abhängigkeit ist jedoch meist nicht linear. Um die zeitliche Variabilität zu berücksichtigen, wird eine entsprechend hohe zeitliche Auflösung für die Parameter festgesetzt. Die Beobachtungsintervalle, aus denen ein Parameter geschätzt wird, dürfen jedoch nicht zu klein gewählt werden, da anderenfalls zu wenig Beobachtungen zur Verfügung stehen, um die einzelnen Parameter sicher schätzen zu können. Die zeitliche Variation eines geschätzten Parameters über die Länge eines Schätzintervalls wird entweder als Null (im Fall von Stationspositionen) oder als zeitlich-linear (im Fall von EOP und Troposphärenparametern) angenommen. In letzterem Fall erfolgt die Parametrisierung derart, dass zu Beginn und Ende des Intervalls je der Funktionswert einer Geraden geschätzt wird. Beide Parameter sind somit linear verknüpft. Die Darstellung wird in dieser Arbeit als *stückweise stetige Darstellung* bezeichnet. Der Vorteil dieser Darstellung ist, dass die zeitliche lineare Änderung eines Parameters während des Schätzintervalls berücksichtigt ist, ohne dass diese selbst als Parameter geschätzt werden muss. Eine lineare Änderung ist oft nur mit geringer Genauigkeit schätzbar und kann dadurch die Kondition des Normalgleichungssystems schwächen.

Wird eine *stückweise stetige Darstellung* gewählt, so können die Parameter direkt aufeinanderfolgender Intervalle an den Intervallgrenzen kombiniert werden. Dies führt zu einer zusätzlichen Stabilisierung des Normalgleichungssystems und zu einer Verringerung der Anzahl zu schätzender Parameter. Diese Darstellung wird im Folgenden *kontinuierliche, stückweise stetige Darstellung* genannt. Die Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über die gewählte Parametrisierung der gemeinsamen Parameter.

Die VLBI-Sessions starten und enden in aller Regel nicht um 0 Uhr. Die Referenzepochen der täglich aufgelösten EOP und Troposphärengradienten und der stündlich aufgelösten troposphärischen Laufzeitverzögerung

Tabelle 5.1: Parametrisierung gemeinsamer Parameter von GPS, VLBI und SLR. Die Abbildung 4.1 gibt eine Übersicht, welche Parameter aus den Beobachtungen welcher Beobachtungsverfahren bestimmt werden können.

Parameter	zeitliche Auflösung	geometrische Darstellung
Stationskoordinaten	ein Tag	zeitlich konstant
Nutationsparameter	zwei Parameter pro Tag (zu 0 Uhr und 24 Uhr) für beide Nutationswinkel ($\Delta\psi$ und $\Delta\epsilon$)	stückweise stetige Darstellung
Polkoordinaten und UT1-UTC	zwei Werte pro Tag (zu 0 Uhr und 24 Uhr)	stückweise stetige Darstellung
Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (feuchter Anteil)	eine Stunde (25 Werte pro Tag)	stückweise stetige Darstellung, kontinuierlich über 24 Stunden
Troposphärengradienten	zwei Werte pro Tag (zu 0 Uhr und 24 Uhr)	stückweise stetige Darstellung

in Zenitrichtung sind deshalb ebenfalls nicht volle Stunden. Die Parameter der VLBI-Normalgleichungen sind zunächst als ein Parameter zur Intervallmitte und eine erste zeitliche Ableitung dargestellt. Unter Verwendung der in Kapitel 4.2.4 unter *c) Transformation zwischen verschiedenen Parametrisierungen* angegebenen Transformationsgleichungen werden die Parameter in eine stückweise stetige Darstellung überführt, wobei im Falle der EOP als Referenzepochen die an die Intervallmitte angrenzende 0 Uhr- und 24 Uhr-Epoche gewählt werden. Bei subtäglicher Auflösung der Parameter werden die angrenzenden vollen Stunden als neue Referenzepochen gewählt. Durch Kombination der subtäglichen Parameter an den Intervallgrenzen wird innerhalb einer Session für die subtäglich aufgelösten Parameter eine kontinuierliche, stückweise stetige Darstellung erhalten. Es ist anzumerken, dass durch die Transformation der aus VLBI bestimmten Parameter auf neue Referenzepochen die Genauigkeit der Parameter abnimmt. Für eine Kombination mit anderen Raumbeobachtungsverfahren ist eine solche Epochentransformation auf volle Stunden jedoch notwendig.

VLBA-Sessionen

Das *Very Long Baseline Array* (VLBA) ist ein speziell angelegtes Netz von VLBI-Stationen, die bis auf wenige Ausnahmen nur gemeinsame (VLBA-interne) Beobachtungen durchführen. Diese Beobachtungssessionen werden auch VLBA-Sessionen genannt. Das VLBA-Programm ist eine Studie des *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) der USA (NRAO 1988). Es wurde bereits in den 80er Jahren geplant und der Aufbau der Stationen zu Beginn der 90er Jahre abgeschlossen. Das Programm soll dazu dienen, festzustellen, mit welcher maximalen Genauigkeit geodätische Parameter aus VLBI-Beobachtungen abgeleitet werden können. Dafür wurde ein Netz aus elf Stationen in den USA (inklusive Alaska, Hawaii und den Virgin Islands) angelegt. Alle Stationen wurden mit demselben Antennentyp ausgestattet, um die Modellierung von Antennenspezifika zu vereinheitlichen und systematische Unterschiede zwischen den Stationen auszuschließen (NAPIER 1995). Aufgrund der hohen Dichte des Stationsnetzes und wegen der konstanten Netzgeometrie liefern die VLBA-Sessionen einen sehr homogenen Datensatz, wie er aus den üblichen VLBI-Sessionen des IVS nicht erhalten wird. In den für diese Arbeit verwendeten Daten sind insgesamt 13 über den gesamten Zeitraum verteilte VLBA-Sessionen enthalten. Während dieser Sessionen beobachtete ein Netz aus sechs VLBA-Stationen, das in Abbildung 5.2 dargestellt ist.

CONT-Kampagnen

Vom 16. bis 31. Oktober 2002 und vom 12. bis 27. September 2005 fanden die vom IVS initiierten VLBI-Beobachtungskampagnen CONT02 und CONT05 statt (THOMAS und MACMILLAN 2003, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont02/index.html> und <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont05/index.html>, 12.07.2007). Sie sind die Fortsetzung der drei erfolgreichen Experimente CONT94, CONT95 und CONT96. Während üblicherweise geodätische VLBI-Sessionen nur zwei- bis dreimal pro Woche stattfinden und dabei Netze unterschiedlicher Konfigurationen beobachtet werden, wurden während der CONT-Kampagnen über einen Zeitraum von 15 Tagen kontinuierlich VLBI-Beobachtungen in einem

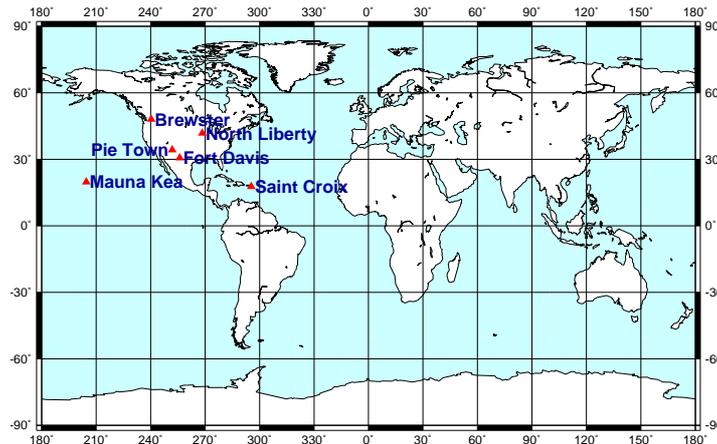


Abbildung 5.2: Konfiguration des Very Long Baseline Array (VLBA) während des in dieser Arbeit betrachteten Zeitraums.

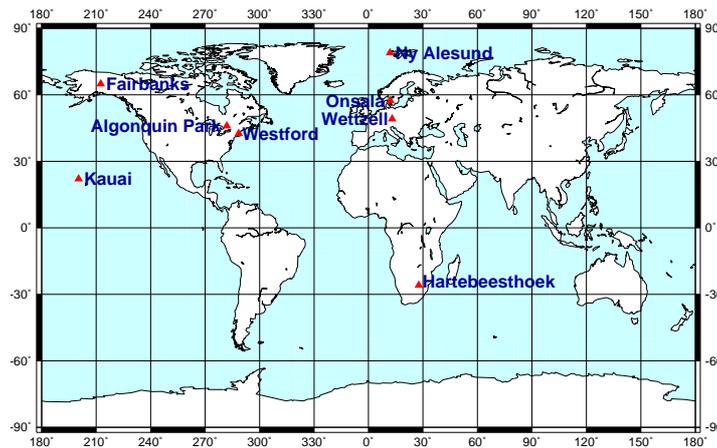
gleichbleibenden Netz global gut verteilter VLBI-Stationen durchgeführt. An der Kampagne CONT02 nahmen insgesamt acht, an CONT05 elf VLBI-Stationen teil. Die Abbildung 5.3 zeigt die jeweilige Netzkonfiguration. Das Ziel dieser Kampagnen ist es zu zeigen, mit welcher Genauigkeit geodätische Parameter aus einem globalen Stationsnetz mit einer hohen Beobachtungsdichte und unter Verwendung modernster VLBI-Technik abgeleitet werden können. Die hohe Genauigkeit soll gleichzeitig genutzt werden, um noch existierende Defizite in der Modellierung aufzudecken.

Wegen der Kontinuität der Beobachtungsreihen während der CONT-Kampagnen, eignen sich diese Daten besonders für die Kombination mit anderen Beobachtungsverfahren. Die VLBI-Beobachtungen können zu 24-h-Sessionen von 0 Uhr bis 24 Uhr zusammengefasst werden, wie sie bei GPS und SLR üblich sind. Die unbekannt Parameter können dann zu denselben Epochen wie aus den übrigen Verfahren bestimmt werden. Die Korrelation von VLBI-Beobachtungen im Korrelator erfolgt allerdings auch während der CONT-Kampagnen in den üblichen Beobachtungsblöcken mit Start- und Endzeitpunkten, die von 0 Uhr und 24 Uhr UTC abweichen. Die Beobachtungen dieses Zeitraums sind durch die gemeinsame Auswertung im Korrelator miteinander korreliert. Werden nun Sessionen aus den Beobachtungen von 0 Uhr bis 24 Uhr gebildet, so werden Beobachtungen aus verschiedenen Korrelatorauswertungen miteinander verknüpft. Für die korrekte Berücksichtigung des Uhrverhaltens wurden zwischen den vom Korrelator gelieferten Sessionen Uhrensprünge eingeführt.

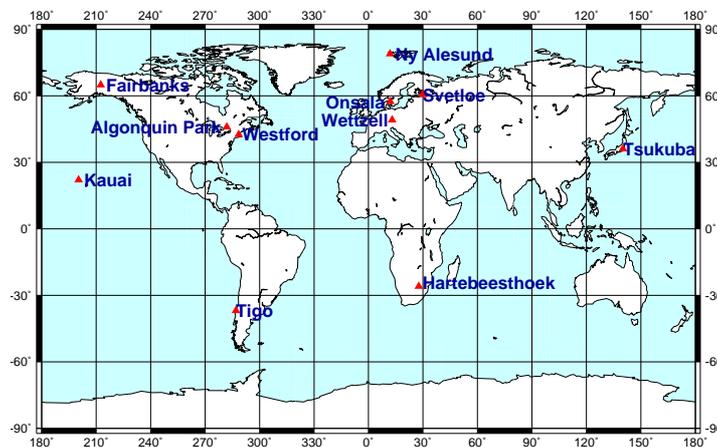
Bei der Untersuchung des Genauigkeitspotentials des VLBI-Verfahrens spielt der Vergleich mit den Ergebnissen anderer Beobachtungsverfahren eine entscheidende Rolle. Deshalb wurde bei der Auswahl der an den CONT-Kampagnen beteiligten Stationen darauf geachtet, dass sich in unmittelbarer Nachbarschaft zur VLBI-Antenne eine GPS-Station sowie teilweise auch eine SLR-Station befand. Zudem wurden auf einigen Stationen Wasserdampfadiometer (engl.: *Water Vapor Radiometer* (WVR)) installiert. Sie ermöglichen eine Validierung der aus VLBI oder GPS bestimmten Troposphärenparameter. Die Tabellen 5.2 und 5.3 geben einen Überblick über die während beider Kampagnen auf den Stationen betriebenen Beobachtungsverfahren. Für die Bezeichnung der Referenzpunkte, auf die sich die Beobachtungen beziehen, werden in dieser Arbeit die vom IERS eingeführten sogenannten DOMES-Nummern (engl.: *DOMES numbers*, http://ilrs.gsfc.nasa.gov/stations/site_procedures/domes_and_domex, 16.05.2008) und die vier Zeichen umfassende Kurzbezeichnungen verwendet. Im Fall der SLR- und VLBI-Stationen entsprechenden die Kurzbezeichnungen den vom ILRS beziehungsweise IVS verwendeten Stationsnummern. Die ersten fünf Stellen der DOMES-Nummern sind für alle auf einer Station befindlichen Referenzpunkte gleich, so dass die Identifikation der Station anhand dieser fünf Stellen erfolgen kann.

5.1.2 Terrestrisch bestimmte Differenzvektoren

Gemessene Differenzvektoren zwischen den Referenzpunkten sind für eine Kombination der Stationskoordinatennetze der verschiedenen Verfahren von zentraler Bedeutung. Sie werden auf sogenannten Ko-lokationsstationen, also Stationen auf denen Raumbeobachtungsverfahren in unmittelbarer Nachbarschaft beobachten, bestimmt. Dabei kommen überwiegend terrestrische Messverfahren zum Einsatz (u.a. JOHNSTON und DAWSON 2004(a),



(a) CONT02



(b) CONT05

Abbildung 5.3: Netzkonfiguration der VLBI-Kampagnen CONT02 und CONT05.

HAAS und ESCHELBACH 2005, SARTI *et al.* 2004). Die Vektoren werden deshalb auch als terrestrische Differenzvektoren bezeichnet. Die aktuell verfügbaren Differenzvektoren werden vom ITRF Produktzentrum des IERS zur Verfügung gestellt (http://itrf.ensg.ign.fr/local_surveys.php, 21.01.2008).

Um die von den Raubeobachtungsverfahren erreichte Genauigkeit von wenigen Millimetern auch für die kombinierten Stationskoordinaten zu gewährleisten, sollten die Differenzvektoren auf weniger als 1 mm genau bestimmt sein. Es ist jedoch in vielen Fällen sehr schwierig, diese Genauigkeit zu erreichen. Eine wesentliche Ursache dafür ist, dass die Referenzpunkte, auf die sich die Beobachtungen der Raubeobachtungsverfahren beziehen, nicht zugänglich sind und geometrisch rekonstruiert werden müssen (STEINFORTH *et al.* 2003, SARTI *et al.* 2004). Zudem ist die Lage des Referenzpunkts im Instrument oftmals von der Beobachtungsrichtung abhängig, so dass ein im Mittel für alle Beobachtungen gültiger Referenzpunkt für das Instrument abgeleitet werden muss. Im Fall von GPS werden mit Hilfe von Kalibrierverfahren die Antennencharakteristika entweder für jeden Antennentyp oder auch individuell bestimmt (siehe Kapitel 3.2.2.3). Für die Messung der Differenzvektoren kann die Antenne von ihrem Standpunkt genommen und beispielsweise durch einen Reflektor ersetzt werden. Durch terrestrische Messungen zum Reflektor und dem Anbringen der Phasenzentrumskorrektur ist der Referenzpunkt gut rekonstruierbar. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass die kontinuierliche Beobachtungsreihe der GPS-Station für die Ausführung der terrestrischen Messungen unterbrochen werden muss. Dagegen stellt sich das Problem für SLR- und VLBI-Stationen anders dar: Die Rekonstruktion der Referenzpunkte, auch bezeichnet als invariante Referenzpunkte (IVP) (DAWSON *et al.* 2005(a)), muss durch terrestrische Messungen zu auf dem Laser-

Tabelle 5.2: Stationen der CONT02-Kampagne des IVS.

Station	VLBI-Station	GPS-Station	SLR-Station	WVR
10317 Ny-Alesund	10317S003 7331	10317M003 NYA1		
10402 Onsala	10402S002 7213	10402M004 ONSA		a
14201 Wettzell	14201S004 7224	14201M010 WTZR	14201S018 8834	b
30302 Hartebeesthoek	30302S001 7232	30302M004 HRAO	30302M003 7501	
40104 Algonquin Park	40104S001 7282	40104M002 ALGO		
40424 Kokee Park	40424S007 7298	40424M004 KOKB		b
40408 Fairbanks	40408S002 7225	40408M001 FAIR		
40440 Westford	40440S003 7209	40440S020 WES2		b
a ASTRID (ELGERED und LUNDH 1983)				
b Radiometrix (RADIOMETRICS CORP. 1999)				

Tabelle 5.3: Stationen der CONT05-Kampagne des IVS.

Station	VLBI-Station	GPS-Station	SLR-Station	WVR
10317 Ny-Alesund	10317S003 7331	10317M003 NYA1		
10402 Onsala	10402S002 7213	10402M004 ONSA		a
12350 Svetloe	12350S001 7380	12350M001 SVTL		
14201 Wettzell	14201S004 7224	14201M010 WTZR	14201S018 8834	b
21730 Tsukuba	21730S007 7345	21730S005 TSKB		b
30302 Hartebeesthoek	30302S001 7232	30302M004 HRAO	30302M003 7501	
40104 Algonquin Park	40104S001 7282	40104M002 ALGO		b
40424 Kokee Park	40424S007 7298	40424M004 KOKB		b
40408 Fairbanks	40408S002 7225	40408M001 FAIR		
40440 Westford	40440S003 7209	40440S020 WES2		
41719 Conception	41719S001 7640	41719M002 CONZ	41719S002 7405	
a ASTRID (ELGERED und HAAS 2003)				
b Radiometrics (RADIOMETRICS CORP. 1999)				

beziehungsweise VLBI-Teleskop angebrachten Zielpunkten erfolgen. Um die Abhängigkeit des Referenzpunkts von der Beobachtungsrichtung zu berücksichtigen, werden die Messungen für verschiedene Azimut- und Elevationswinkel des Instruments wiederholt. Die Berechnung des Referenzpunkts erfolgt auf der Grundlage eines geometrischen Modells des Instruments und den terrestrischen Beobachtungen in einer Ausgleichung. SARTI *et al.* (2004) geben am Beispiel des Radioteleskops der Station Matera (Italien) eine genaue Beschreibung der Bestimmung des Referenzpunkts. DAWSON *et al.* (2007) schätzen ab, dass die Bestimmung des IVP mit den heute verwendeten geometrischen Modellen mit einer Genauigkeit von 0.5 mm erfolgen kann.

Ko-lokationsstationen sollten eine hohe Stabilität des geologischen Untergrundes aufweisen, um eine zeitliche Änderung der Geometrie des lokalen Netzes auszuschließen und die Gültigkeit eines gemessenen Differenzvektors über einen längeren Zeitraum hinweg zu garantieren. Für einige Ko-lokationsstationen zeigen die Bewegungen der einzelnen Referenzpunkte jedoch signifikante Unterschiede, zum Beispiel wegen eines ungleichen Setzungsverhaltens der Instrumente. Um solche Änderungen des lokalen Netzes zu erfassen und die erforderliche hohe Genauigkeit der Differenzvektoren zu gewährleisten, müssen regelmäßig Wiederholungsmessungen durchgeführt werden. Wiederholungsmessungen sind bisher jedoch nur für einige wenige Stationen verfügbar. Als Beispiel für eine solchen Station sei Wettzell genannt, für welche ein permanentes Überwachungsnetz installiert wurde (SCHLÜTER *et al.* 2005). Eine im Jahr 2004 gegründete Arbeitsgruppe des IERS mit dem Namen *Working Group on Site Survey and Co-location* hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Bestimmung bisher nicht beobachteter Differenzvektoren und die Wiederholungsmessung existierender lokaler Netze weltweit voranzubringen. Es kann davon ausgegangen werden, dass dank der Arbeit dieser Gruppe in den kommenden Jahren die Zahl zuverlässig bestimmter Differenzvektoren weiter zunimmt.

Bisher werden die Differenzvektoren meist in einem globalen terrestrischen Datum, dem Datum des ITRF2000, zur Verfügung gestellt. Die Orientierung der lokalen Netze ist damit bereits festgelegt und die Verwendung der

Differenzvektoren auf Kombinationslösungen beschränkt, deren Orientierung identisch mit der des ITRF2000 ist. Diese Einschränkung besteht nicht, wenn die Ergebnisse der lokalen Netzmessungen entweder in Form freier Normalgleichungen oder einer Lösung mit voller Varianz-Kovarianzmatrix und der vollständigen Information über die Datumsfestlegung zur Verfügung gestellt werden. Dann kann in der Kombination über das Datum der lokalen Netze frei verfügt werden. Die freie Normalgleichung beziehungsweise die Information über die Datumsfestlegung wird allerdings bisher nur für einige wenige lokale Netze zur Verfügung gestellt.

Für die in dieser Arbeit verwendeten GPS- und VLBI-Beobachtungsdaten sind insgesamt 26 Ko-lokationsstationen vorhanden, die in Tabelle 5.4 aufgelistet sind. Auf den Stationen Ny Alesund und Fortaleza sind jeweils zwei GPS-Stationen installiert. Für GPS und SLR gibt es 21 Ko-lokationen (Tabelle 5.5), wobei auf den Stationen Grasse, Potsdam und Fort Davis je zwei SLR-Teleskope und auf den Stationen Washington und Yarragadee je zwei GPS-Stationen beobachtet. Für eine Kombination des VLBI- und SLR-Stationenkoordinatennetzes stehen sieben Ko-lokationen zur Verfügung (Tabelle 5.6). Die globale Verteilung aller Ko-lokationsstationen ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4: Ko-lokationen zwischen GPS und VLBI

Ko-lokationen zwischen GPS und VLBI							
Station		GPS-Station I		GPS-Station II		VLBI-Station	
10317	Ny Alesund	10317M001	NYAL	10317M003	NYA1	10317S003	7331
10402	Onsala	10402M004	ONSA			10402S002	7213
12350	Svetloe	12350M001	SVTL			12350S001	7380
12711	Medicina	12711M003	MEDI			12711S001	7230
12717	Noto	12717M004	NOT1			12717S001	7547
12734	Matera	12734M008	MATE			12734S005	7243
13420	Yebes	13420M001	YEBE			13420S001	7333
14201	Wettzell	14201M010	WTZR			14201S004	7224
21605	Shanghai	21605M002	SHA0			21605S009	7227
21612	Urumqui	21612M001	URUM			21612S001	7330
21730	Tsukuba	21730S005	TSKB			21730S007	7345
30302	Hartebeesthoek	30302M004	HRA0			30302S001	7232
40104	Algonquin Park	40104M002	ALGO			40104S001	7282
40408	Fairbanks/Gilcreek	40408M001	FAIR			40408S002	7225
40424	Kokee Park	40424M004	KOKB			40424S007	7298
40440	Westford	40440S020	WES2			40440S003	7209
40442	Fort Davis	40442M012	MD01			40442S017	7613
40456	Pietown	40456M001	PIE1			40456S001	7234
40465	North Liberty	40465M001	NLIB			40465S001	7612
40473	Brewster	40473M001	BREW			40473S001	7614
40477	Mauna Kea	40477M001	MKEA			40477S001	7617
41602	Fortaleza	41602M001	FORT	41602M002	BRFT	41602S001	7297
41719	Conception	41719M002	CONZ			41719S001	7640
43201	Saint Croix	43201M001	CR01			43201S001	7615
50116	Hobart	50116M004	HOB2			50116S002	7242

Für 23 der Ko-lokationen von GPS und VLBI sind terrestrisch gemessene Differenzvektoren verfügbar. Bis auf eine Ausnahme wurden die Differenzvektoren verwendet, die für die Berechnung des ITRF2005 offiziell zur Verfügung gestellt wurden (http://itrf.ensg.ign.fr/local_surveys.php, 25.04.2007). Einige Differenzvektoren sind als Vektoren gegeben, für andere Stationen liegen die Ergebnisse der Ausgleichung des lokalen Netzes im SINEX-Format vor. Nur für die letzteren sind die Epochen, zu denen die lokalen Messungen durchgeführt wurden, bekannt. Die Tabellen 10, 11 und 12 im Anhang geben eine Übersicht über die verfügbaren Differenzvektoren, deren Epochen und die Bezugsquellen. Die instrumentelle Ausstattung der Ko-lokationsstationen ist in den Tabellen 13, 14 und 15 dokumentiert.

Für die Mehrzahl der verwendeten Differenzvektoren sind entweder die Standardabweichungen oder die gesamte Varianz-Kovarianzmatrix der Ausgleichung des lokalen Netzes veröffentlicht. Diese Standardabweichungen erscheinen jedoch teilweise unrealistisch. So erreichen die Standardabweichungen einiger Vektorkomponenten Werte von weniger als 0.05 mm (http://itrf.ensg.ign.fr/local_surveys.php unter *Local tie SINEX files*, 23.05.2007). Selbst mit hochgenauen Messgeräten wie dem Laserradar und einer hohen Redundanz ist diese Genauigkeit für

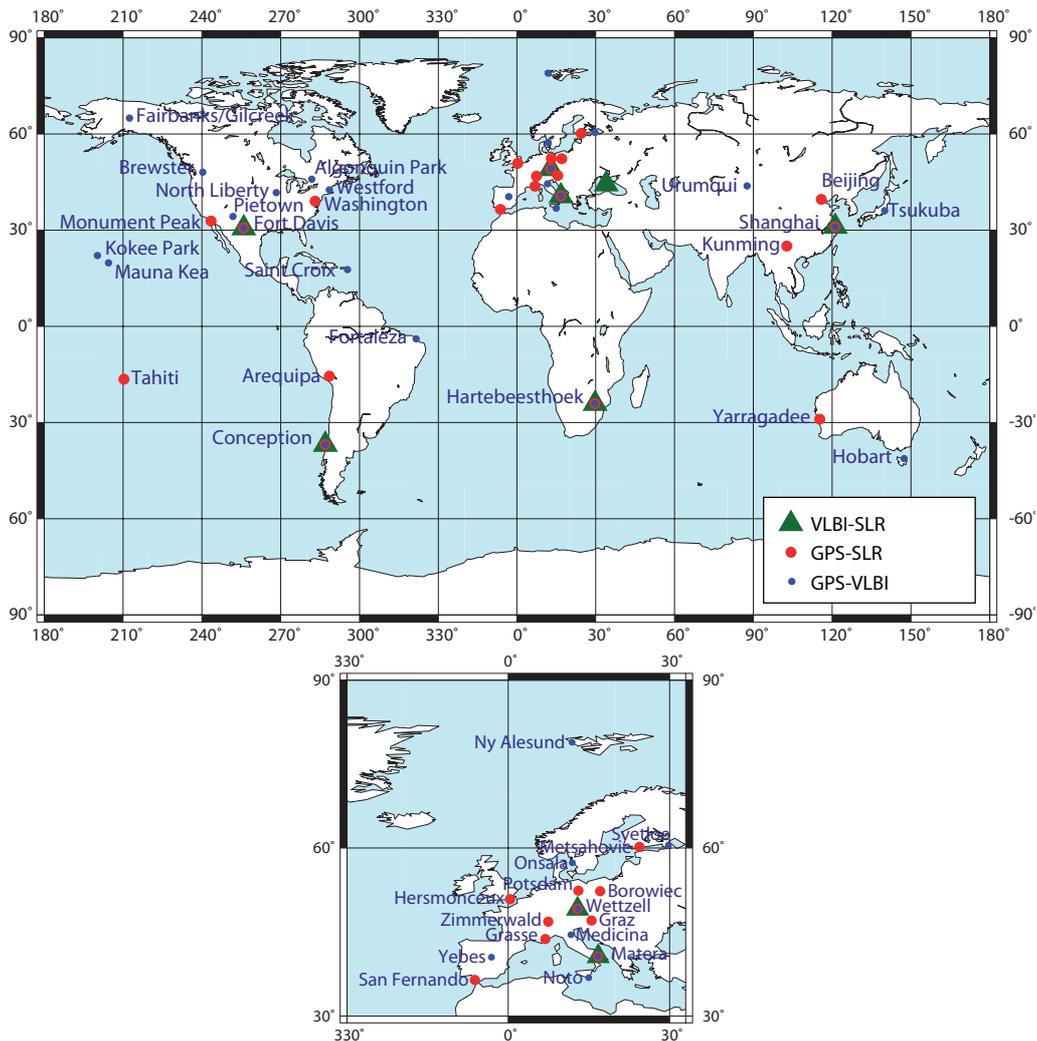


Abbildung 5.4: Übersicht der vorhandenen Ko-lokationsstationen. Europa ist im unteren Teil der Abbildung noch einmal vergrößert dargestellt.

Netze mit einer Ausdehnung von mehreren 100 m nicht zu erreichen (HENNES *et al.* 2004). Die Standardabweichungen müssen daher als überschätzt angesehen werden. Für andere lokale Netze werden Standardabweichungen im Bereich von etwa 0.1 mm angegeben. Wiederholungsmessungen auf diesen Stationen zeigen aber eine Abweichung der Position von etwa 1.0 - 2.0 mm (SARTI *et al.* 2004, JOHNSTON und DAWSON 2004(a), JOHNSTON und DAWSON 2004(b)). Die Ursache für diese Differenzen können lokale Veränderungen auf der Station sein. Wird jedoch von einer hohen Stabilität der Station ausgegangen, so müssen diese Differenzen als Wiederholungsgenauigkeit der lokalen Netzmessung interpretiert werden. Diese spiegelt dann die tatsächliche Genauigkeit des Differenzvektors wider. Wenn auch die Ursache für die Differenzen zwischen den Wiederholungsmessungen nicht bekannt ist, so zeigen diese doch, dass die Differenzvektoren mit Vorsicht in der Kombination verwendet werden sollten und dass Wiederholungsmessungen zur Überwachung des lokalen Netzes unabdingbar sind.

Für einige der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren, die nachträglich am IGN in das SINEX-Format gebracht wurden (ALTAMIMI *et al.* 2002, ALTAMIMI *et al.* 2007), ist auffällig, dass die Standardabweichungen für alle drei Komponenten des Vektors identisch sind. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese Standardabweichungen nicht aus der ursprünglichen Netzausgleichung stammen, sondern anderweitig bestimmt wurden. Aus den genannten Gründen können die angegebenen Standardabweichungen beziehungsweise Varianz-Kovarianzmatrizen der Differenzvektoren im Folgenden nicht verwendet werden. Stattdessen müssen empirisch bestimmte Standardabweichungen herangezogen werden.

Tabelle 5.5: Ko-lokationen zwischen GPS und SLR

Ko-lokationen zwischen GPS und SLR									
Station		GPS-Station I		GPS-Station II		SLR-Station I		SLR-Station II	
10002	Grasse	10002M006	GRAS			10002S001	7835	10002S002	7845
10503	Metsahovie	10503S011	METS			10503S014	7806		
11001	Graz	11001M002	GRAZ			11001S002	7839		
12205	Borowiec	12205M002	BOR1			12205S001	7811		
12734	Matera	12734M008	MATE			12734S008	7941		
13212	Herstmonceaux	13212M007	HERS			13212S001	7840		
13402	San Fernando	13402M004	SFER			13402S007	7824		
14001	Zimmerwald	14001M004	ZIMM			14001S007	7810		
14106	Potsdam	14106M003	POTS			14106S009	7836	14106S011	7841
14201	Wettzell	14201M010	WTZR			14201S018	8834		
21601	Beijing	21601M001	BJFS			21601S004	7249		
21605	Shanghai	21605M002	SHAO			21605S001	7837		
21609	Kunming	21609M001	KUNM			21609S002	7820		
30302	Hartebeesthoek	30302M004	HRAO			30302M003	7501		
40442	Fort Davis	40442M012	MD01			40442M006	7080		
40451	Washington	40451M123	GODE	40451S003	USNO	40451M105	7105	40451M116	7130
40497	Monument Peak	40497M004	MONP			40497M001	7110		
41719	Conception	41719M002	CONZ			41719M001	7405		
42202	Arequipa	42202M005	AREQ			42202M003	7403		
50107	Yarragadee	50107M004	YAR1	50107M006	YARR	50107M001	7090		
92201	Tahiti	92201M009	THTI			92201M007	7124		

Tabelle 5.6: Ko-lokationen zwischen VLBI und SLR

Ko-lokationen zwischen VLBI und SLR					
Station		VLBI-Station		SLR-Station	
12337	Simeis	12337S008	7332	12337S006	1893
12734	Matera	12734S005	7243	12734S008	7941
14201	Wettzell	14201S004	7224	14201S018	8834
21605	Shanghai	21605S009	7227	21605S001	7837
30302	Hartebeesthoek	30302S001	7232	30302M003	7501
40442	Fort Davis	40442S017	7613	40442M006	7403
41719	Conception	41719S001	7640	41719M001	7124

5.2 Realisierung eines zeitabhängigen Referenzsystems

5.2.1 Kombination eines zeitabhängigen Referenzrahmens je Beobachtungsverfahren

5.2.1.1 Rekonstruktion der freien Normalgleichungen aus den SINEX-Dateien

Die GPS- und VLBI-Daten liegen als bedingungsfreie Normalgleichungen im SINEX-Format der Version 2.01 vor. Sie werden direkt in das DOGS-CS-eigene Format umgewandelt. Die SLR-Daten stehen ebenfalls als Normalgleichungen im SINEX-Format 2.01 zur Verfügung. Die Normalgleichungen sind jedoch nicht bedingungsfrei. Die Normalgleichungen werden deshalb unter Verwendung der Gleichung 4.80 um die in der SINEX-Datei angegebenen Bedingungen reduziert.

5.2.1.2 Analyse und Kombination der Normalgleichungen

Die Berechnung eines terrestrischen Referenzrahmens wird, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, in mehreren Schritten ausgeführt. Zunächst erfolgt die Kombination der Tages- bzw. Wochennormalgleichungen zu einer Normalgleichung je Beobachtungsverfahren. Dies umfasst die folgenden Aufgaben:

- 1. Näherungswertanpassung an einen einheitlichen Referenzkoordinatensatz
- 2. Einführung von Unstetigkeiten und Reduktion der Ausreißer
- 3. Einführung von Geschwindigkeiten als zusätzliche Parameter und Transformation der Positionen auf eine einheitliche Referenzepoche
- 4. Addition der Normalgleichungen und Berechnung einer vorläufigen Lösung
- 5. Festlegung des geodätischen Datums
- 6. Analyse der Stationspositionszeitreihen; Identifikation von Ausreißern und Sprüngen
- → Wiederholung der Schritte 2 - 6, bis keine weiteren Ausreißer und Sprünge identifiziert werden.

1. Näherungswertanpassung an einen einheitlichen Referenzkoordinatensatz

Die Festlegung des geodätischen Datums erfolgt mit Hilfe von Bedingungen, die sich auf die Näherungswerte beziehen. Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Lösungen zu gewährleisten, muss ein für alle Lösungen konsistenter Satz an Näherungskordinaten verwendet werden. Als Referenzkoordinatensatz wird der ITRF2005 gewählt (http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/27.03.2008). Für VLBI wird der Koordinatensatz des ITRF2005 unverändert verwendet.

Die Auswertung der GPS-Beobachtungsdaten für den ITRF2005 erfolgte unter Verwendung relativer Phasenzentrumskorrekturen für die GPS-Antennen und ist damit nicht konsistent zu den in dieser Arbeit berechneten GPS-Lösungen, die unter Verwendung absoluter Phasenzentrumskorrekturen berechnet werden. Vom IGS wurden im Herbst 2006 absolute (siehe Kapitel 3.2.2.3) anstelle der relativen Phasenzentrumskorrekturen adaptiert. Dabei wurde auch der IGS-Referenzrahmen IGT05, der konsistent zum ITRF2005 berechnet wurde, an die neuen Phasenzentrumskorrekturen angepasst. Hierzu wurde für einen Zeitraum von etwa 40 Wochen das IGS-Stationsnetz von mehreren Analysezentren mit beiden Sätzen an Phasenzentrumskorrekturen berechnet. Die sich aus einem Vergleich beider Lösungen ergebenden Koordinatendifferenzen wurden als Korrektur an die IGT05-Positionen angebracht (IGSMail #5447, IGSMail #5455). Der so erhaltene Referenzrahmen trägt den Namen IGS05. Der IGS05 stellt den bisher einzigen öffentlich verfügbaren globalen Koordinatensatz für IGS-Stationen dar, für dessen Berechnung absolute Phasenzentrumskorrekturen verwendet wurden. Er wird in dieser Arbeit als Referenzkoordinatensatz für die GPS-Stationen verwendet.

Für SLR steht die ITRF2005-Lösung in zwei Varianten zur Verfügung, die sich durch ihre Skalierung unterscheiden. In einer ersten Lösung wurde der Maßstab des SLR-Stationsnetzes nicht zur Festlegung des ITRF2005-Netzmaßstabs verwendet. Diese Lösung weist einen signifikanten Skalierungsfaktor bezüglich der zur Berechnung des ITRF2005 verwendeten SLR-Wochenlösungen auf. Eine zweite die sogenannte reskalierte (engl.: *rescaled*) Lösung wurde durch Multiplikation mit einem Skalierungsfaktor an den Netzmaßstab der SLR-Wochenlösungen angepasst (siehe http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005_SLR.php, 22.01.2008). Sie wird in dieser Arbeit als Referenzkoordinatensatz für die SLR-Stationen verwendet.

Die Zuordnung der Stationen der vorliegenden Lösung zu den Stationen der Referenzkoordinatensätze ist aus den Tabellen 3, 5 und 8 im Anhang ersichtlich. Die Gleichungen zur Anpassung der Näherungskordinaten an einen neuen Koordinatensatz sind in Kapitel 4.2.4 angegeben.

2. Einführung von Unstetigkeiten und Reduktion der Ausreißer

Die Ursachen für Unstetigkeiten in den Zeitreihen der Stationspositionen sind vielfältig. So können geophysikalische Effekte wie Erdbeben, aber auch instrumentelle Änderungen auf der Station, zum Beispiel Antennenwechsel bei GPS, eine abrupte Änderung der Stationsposition bewirken (ANGERMANN *et al.* 2005, MEISEL *et al.* 2005). Für jedes der drei Beobachtungsverfahren stand bereits eine Liste an Unstetigkeiten zur Verfügung (persönliche Kommunikation mit P. Steigenberger, V. Tesmer und H. Müller, 2007). Durch die Analyse der Stationskoordinatenzeitreihen konnten weitere Unstetigkeiten identifiziert werden, die bei den folgenden Iterationen ebenfalls berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung einer Unstetigkeit erfolgt durch Ansetzen einer neuen Position und Geschwindigkeit (siehe folgender Abschnitt) für die betroffene Station für die Zeit nach der Unstetigkeit. Für die Bezeichnung des Koordinatensatzes nach der Diskontinuität wird die Lösungsnummer um 1 erhöht. So wird für eine Station mit der Lösungsnummer „A1“ der Koordinatensatz nach der Diskontinuität mit „A2“ bezeichnet.

Die Identifikation von Ausreißern in den Stationspositionszeitreihen erfolgt in Schritt 6. Ausreißer werden daher erst ab der ersten Iteration berücksichtigt. Um eine negative Auswirkung dieser Positionen auf die Gesamtlösung zu vermeiden, wird dafür die Station aus der jeweiligen täglichen Normalgleichung reduziert (vergl. Kapitel 4.2.7).

3. Einführung von Geschwindigkeiten als zusätzliche Parameter und Transformation der Positionen auf eine einheitliche Referenzepoche

Die Einführung von Stationsgeschwindigkeiten erfolgt für die einzelne Tagesnormalgleichung (im Fall von SLR Wochennormalgleichungen) entsprechend den Gleichungen in Kapitel 4.2.6. Die Referenzepoche jeder einzelnen Tagesnormalgleichung ist 12 Uhr des jeweiligen Tages. Als Referenzepoche für die zeitabhängige Lösung wird die Mitte des gesamten Beobachtungsintervalls gewählt: 0 Uhr am 16. Oktober 2003. Die Transformation der Koordinaten von der aktuellen Epoche auf die Referenzepoche der zeitabhängigen Lösung wird entsprechend den Gleichungen in Kapitel 4.2.4 durchgeführt.

4. Addition der Normalgleichungen und Berechnung einer vorläufigen Lösung

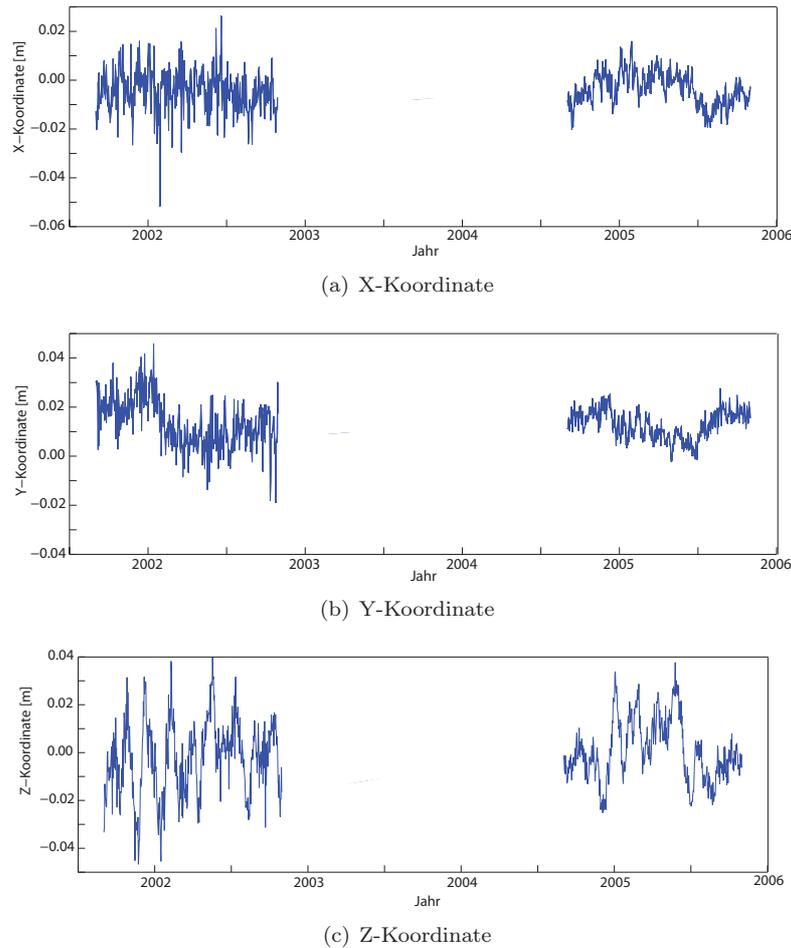
Die Addition der täglichen Normalgleichungen zu einer Normalgleichung je Beobachtungsverfahren, die jeweils alle Beobachtungen beinhaltet, erfolgt unter Anwendung der Gleichungen in Kapitel 4.2.2.

5. Festlegung des geodätischen Datums

Die GPS-Normalgleichung weist sechs Rangdefekte bezüglich der Orientierung und deren erster zeitlicher Ableitung auf. Die Festlegung dieser Rangdefekte erfolgt durch je eine NNR-Bedingung für Stationspositionen und -geschwindigkeiten (siehe Kapitel 4.2.8). Zusätzlich ergeben sich Rotationsdefekte, da die Nutationsparameter und UT1-UTC mit den Bahnparametern der GPS-Satelliten (Rektaszension des aufsteigenden Knotens, Inklination und dem Argument der Länge) zu 100% korreliert sind (ROTHACHER *et al.* 1999). Zur Behebung dieses Defekts werden die Nutationsparameter und UT1-UTC zu den beiden an die Referenzepoche anschließenden Epochen (01.11.2002, 0 Uhr und 02.09.2004, 0 Uhr) auf ihre Näherungswerte fixiert. Die Näherungswerte für UT1-UTC werden durch Addition modellierter subtägliche Variationen der Erdrotation (MCCARTHY und PETIT 2004) zur IERS EOP 05 C04-Reihe (http://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc04_05, 22.01.2008) erhalten. Für die Nutationsparameter werden die Näherungswerte dem Nutationsmodell IAU2000A (MATHEWS *et al.* 2002, MCCARTHY und PETIT 2004) entnommen. Zudem werden tägliche Geozentrumskoordinaten als Parameter eingeführt. Als Geozentrumsparameter werden hier die Koordinaten des Massenschwerpunkts der Erde in Bezug auf den gewählten Referenzrahmen bezeichnet. In einer ersten Lösung werden diese Parameter zu Null gesetzt, was die Festlegung des Koordinatenursprungs im Massenschwerpunkt bedeutet. Zur Analyse des aus GPS-Beobachtungen bestimmten Massen-zentrums wird eine Lösung berechnet, bei der der Koordinatenursprung nicht durch Fixieren der Geozentrumskoordinaten sondern durch eine NNT-Bedingung (vergl. Kapitel 4.2.8) so festgelegt wird, dass er dem Ursprung des ITRF2005 zur gewählten Referenzepoche entspricht. Die mit täglicher Auflösung geschätzten Koordinaten des Massenschwerpunkts sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Streuungen werden unter Berücksichtigung der Standardabweichungen berechnet (WRMS).

Während die X- und die Y-Komponente einer geringen Variation von etwa 7.5 mm unterliegen, die von einem jährlichen Signal dominiert wird, zeigt die Z-Komponente zusätzlich eine Periode von genau 50 Tagen mit einer Amplitude von bis zu 4 cm. Die jährlichen Signale haben zwei wesentliche Ursachen. Einerseits rufen die saisonalen Variationen in der Verteilung von Atmosphären- und kontinentalen Wassermassen sowie nicht gezeitenbedingter Massenverlagerungen im Ozean Jahresperioden in den Koordinaten des Massenschwerpunkts hervor (DONG *et al.* 1997, CHEN *et al.* 1999, BOUILLE *et al.* 2000). Andererseits wird infolge der Korrelation der geschätzten Strahlungsdruckparameter der GPS-Satelliten mit den Koordinaten des Massenschwerpunkts ein näherungsweise jährliches Signal induziert, da die Stellung der Bahnen gegenüber der Sonne mit einer Periode von 350 Tagen repetiert. Hat die Sonne einen großen Elevationswinkel gegenüber einer der Bahnebenen, ist die Korrelation besonders hoch, und es kommt zu einer Verschiebung dieser Bahnebene und damit der geschätzten Position des Massenschwerpunkts (HUGENTOBLER *et al.* 2005). Weshalb die dadurch induzierte Variation der Z-Komponente eine Periode von exakt 50 Tagen aufweist, ist jedoch bislang nicht geklärt (persönliche Kommunikation mit C. Flohrer und P. Steigenberger, April 2008). In der Tabelle in Abbildung 5.5 ist zudem eine Verschiebung der mittleren Y-Komponente von 13.2 mm gegenüber dem Koordinatenursprung angegeben. Eine solche Verschiebung wurde auch von SPRINGER (1999) gezeigt, die Ursache hierfür ist bisher ebenfalls nicht bekannt. Die Z-Komponente unterliegt der Jahresperiode in einem stärkeren Maße als die X- und die Y-Komponente. Die Ursache dafür ist, dass saisonale Massenvariationen auf Nord- und Südhalbkugel mit einer Phasenverschiebung von 180° auftreten. Zonale Unterschiede in den saisonalen Massenverlagerungen treten hingegen weniger systematisch auf.

Es sei erwähnt, dass die Bestimmung der Z-Komponente des Massenschwerpunkts aus Satellitenbeobachtungen generell mit geringerer Genauigkeit erfolgen kann, als die der X- und Y-Komponente (DIETRICH 1988). Die



Koordinate	Mittel [m]	WRMS [m]
X-Koordinate	-0.0041	0.0074
Y-Koordinate	0.0132	0.0076
Z-Koordinate	-0.0010	0.0141

Abbildung 5.5: Zeitreihen der Koordinaten des GPS-Massenschwerpunkts im IGS05 (tägliche Auflösung). Die WRMS-Werte sind ohne Berücksichtigung des Mittelwerts berechnet. Die Standardabweichungen der einzelnen Koordinaten liegen bei etwa 2-3 mm für die X- und Y-Komponente und bei 4-5 mm für die Z-Komponente. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen.

Ursache dafür ist, dass, während die Z-Achse des erdfesten Systems nahezu parallel zu der des inertialen Systems ist, die X- und Y-Achse des erdfesten Systems (System der Stationskoordinaten) eine Rotation im inertialen System ausführen. Verschiebungen der Bahnebene im raumfesten System, beispielsweise wegen Unsicherheiten in der Bahnmodellierung, gehen daher direkt in die Z-Komponente ein, während sie sich für die X- und Y-Komponente bei kontinuierlichen Beobachtungen über 24 Stunden mitteln und nahezu Null ergeben.

Für die Aufstellung der NNR-Bedingungen muss zunächst ein Satz an Stationen ausgewählt werden, der für eine Lagerung des Netzes geeignet ist. Die Auswahl der Stationen erfolgt auf der Grundlage der Ergebnisse der ersten Lösung und der Analyse der Stationskoordinatenzeitreihen (siehe Schritt 6). Folgende Kriterien werden für die Auswahl der Stationen definiert: (a) die Station soll in beiden Jahren 2001/2002 und 2004/2005 beobachtet haben (jeweils mindestens 10 Tage), (b) sie soll bei der Transformation der zeitabhängigen Lösung auf die Näherungskordinaten maximale Residuen von 10 mm in den Positionen und 0.5 mm/a in den Geschwindigkeiten aufweisen und (c) die täglichen Wiederholbarkeiten der Stationspositionen sollen 7 mm für die Lage und 15 mm für die Höhenkomponente nicht überschreiten. Eine Unterscheidung zwischen Lage- und Höhenkomponente ist nötig, da die Lagekomponenten etwa mit der doppelten Genauigkeit der Höhenkomponente bestimmt werden können. Dieser Effekt ist bekannt und resultiert aus der Verteilung der Beobachtungen und Unzulänglichkeiten in der Modellierung. Insbesondere Fehler in der Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung wirken sich verstärkt auf die Höhenkomponente aus (ROTHACHER 2002). Die Festlegung der Kriterien für die Auswahl

der Referenzstationen erfolgt wie auch im Folgenden für VLBI und SLR empirisch anhand der Stationszeitreihen und unter der Maßgabe, dass eine gute globale Verteilung der Stationen gewährleistet sein soll.

Tabelle 3 im Anhang gibt eine Übersicht der GPS-Referenzstationen. Die täglichen Wiederholbarkeiten der Referenzstationen sind in Tabelle 4 dokumentiert.

Die VLBI-Normalgleichung weist einen Rangdefekt von 12 auf. Die Lage des Koordinatenursprungs und die Orientierung des Stationsnetzes sowie deren zeitliche lineare Änderung können nicht aus den VLBI-Beobachtungen selbst, sondern müssen durch die Einführung zusätzlicher Bedingungen festgelegt werden. Die Definition des Datums erfolgt durch die Einführung je einer NNR-Bedingung und einer NNT-Bedingung für Positionen und Geschwindigkeiten, wie sie in Kapitel 4.2.8 beschrieben sind. Die Auswahl der VLBI-Referenzstationen, die in Tabelle 5 zusammengefasst sind, erfolgt nach dem folgenden Kriterium: die Station soll bei der Transformation der zeitabhängigen Lösung auf die Näherungskordinaten maximale Residuen von 20 mm in den Positionen und 0.5 mm/a in den Geschwindigkeiten aufweisen. Wegen der geringen Anzahl an VLBI-Stationen werden auch Stationen, die nur in einem der beiden Jahre beobachtet haben, als Referenzstationen verwendet. Ebenso wird keine Station wegen großer täglicher Wiederholbarkeiten ausgeschlossen.

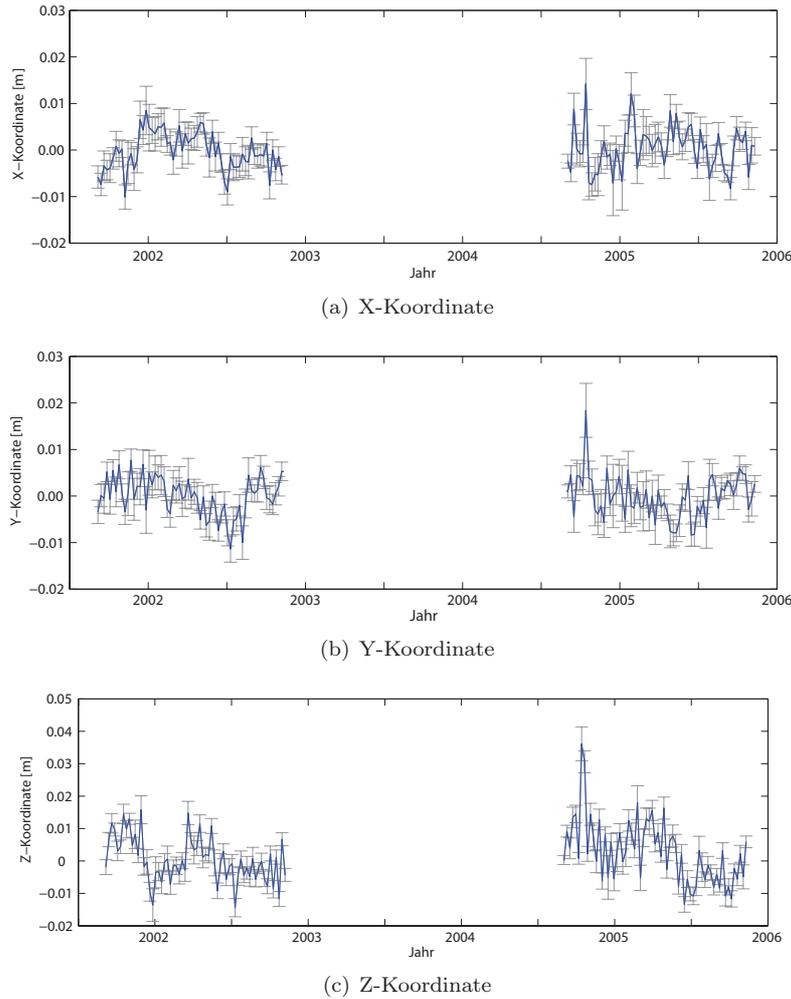
Die SLR-Normalgleichung weist ebenso wie die GPS-Normalgleichung einen Rangdefekt von sechs auf, da die SLR-Beobachtungen keine Information bezüglich der Orientierung des Netzes und deren zeitlicher Ableitung liefern. Die Festlegung der Orientierung erfolgt mit Hilfe einer NNR-Bedingung. Wie auch bei GPS besteht bei SLR eine Korrelation zwischen den geschätzten Erdrotationsparametern und den Satellitenbahnparametern. Aus diesem Grund werden die beiden UT1-UTC-Parameter vor und nach der Referenzepeche auf ihre Näherungswerte fixiert. Die Nutationswinkel sind nicht als zu schätzende Parameter in der Normalgleichung enthalten, sondern wurden von vornherein auf die Werte des Nutationsmodells IAU2000A festgelegt. Die Auswahl der SLR-Referenzstationen erfolgt nach zwei Kriterien. Es werden die Stationen nicht als Referenzstationen verwendet, die nach der Transformation auf die Näherungswerte (ITRF2005) in einer der Komponenten ein Residuum von größer als 20 mm für eine der Positions- oder 10 mm/a für eine der Geschwindigkeitskomponenten aufweisen. Zudem werden die Stationen ausgeschlossen, deren tägliche Wiederholbarkeit für eine der Komponenten größer als 20 mm ist. Die Genauigkeit der SLR-Stationskoordinaten ist für alle drei Komponenten etwa gleich, weshalb nicht zwei verschiedene Grenzwerte für Lage- und Höhenkomponenten verwendet werden wie bei GPS. Wegen der geringen Anzahl an SLR-Stationen werden auch die Stationen als Referenzstationen verwendet, die nur in einem der beiden Jahre, jedoch mindestens 20 Wochen beobachtet haben. Eine Übersicht über die SLR-Referenzstationen gibt die Tabelle 8 im Anhang.

Die SLR-Normalgleichungen enthalten im Vergleich zu den GPS-Normalgleichungen keine Geozentrumskoordinaten. Um die Genauigkeit des aus SLR realisierten Koordinatenursprungs abzuschätzen, werden die Translationsparameter zwischen den wöchentlichen SLR-Lösungen und der zeitabhängigen SLR-Lösung berechnet und analysiert. Die Zeitreihen sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Sie weisen abgesehen von einem Jahressignal keine weiteren periodischen Signale oder Systematiken auf.

6. Analyse der Stationspositionszeitreihen; Identifikation von Ausreißern und Sprüngen

Die Analyse der Stationskoordinatenzeitreihen ist ein notwendiger Schritt, um Unstetigkeiten und Ausreißer in den Stationskoordinatenzeitreihen zu identifizieren. Für die Erzeugung der Zeitreihen werden die täglichen Normalgleichungen unter Verwendung von Datumsbedingungen für Stationspositionen (entsprechend denen der zeitabhängigen Lösung) gelöst und anschließend mittels einer 7-Parameter-Ähnlichkeitstransformation (siehe Kapitel 4.2.5) auf die zeitabhängige Lösung transformiert. Die geschätzten Residuen der Stationskoordinaten spiegeln das zeitliche Verhalten der Station bezogen auf die zeitabhängige Lösung wider. In der Abbildung 5.7 sind beispielhaft die Zeitreihen der Nord- Ost und Höhenkomponente der GPS-Station Macquarie Island (MAC1) dargestellt. Durch das starke Erdbeben (Mw 8.1), das sich am 23.12.2004 in der Region der Macquarie-Inseln ereignete, änderte sich die Position der Station um rund 20 mm in Nord- und 10 mm in Ost-Richtung. In der Zeit nach dem Erdbeben sind Änderungen in der langzeitlichen horizontalen Bewegung der Station erkennbar. Nach etwa einem halben Jahr klingt diese postseismische Bewegung ab, und die Stationsbewegung nähert sich wieder der ursprünglichen Bewegungsrichtung. Ob die Station tatsächlich zu ihrer ursprünglichen Bewegung zurückkehrt, kann anhand der Abbildung 5.7 wegen der Kürze der Zeitreihen nicht festgestellt werden.

Zur Detektion von Unstetigkeiten in den Zeitreihen werden, um den Einfluss von Ausreißern zu minimieren, gleitende Medianwerte mit einer Schrittweite von 14 Tagen berechnet und diese auf Unstetigkeiten hin untersucht. Differenzen benachbarter Medianwerte von mehr als 10 mm für die Lage und 20 mm für die Höhenkomponente werden als Unstetigkeiten angesehen. Nach diesem Kriterium wird für zwei GPS-Stationen zusätzlich zu den bekannten Sprüngen (siehe Schritt 2.) je ein weiterer Sprung identifiziert. Eine Übersicht über alle Unstetigkeiten in den GPS-Stationskoordinatenzeitreihen gibt Tabelle 2 im Anhang. Im Fall der VLBI-Stationskoordinatenzeitreihen ist nur eine Unstetigkeit für die Station Gilcreek wegen eines Erdbebens



Koordinate	WRMS [m]
X-Koordinate	0.0040
Y-Koordinate	0.0040
Z-Koordinate	0.0075

Abbildung 5.6: Zeitreihen der Koordinaten des SLR-Massenschwerpunkts im ITRF2005 (reskaliert) (wöchentliche Auflösung).

am 3. November 2002 bekannt (V. Tesmer, persönliche Mitteilung, 2007). Weitere Sprünge werden für VLBI nicht identifiziert. Für die SLR-Stationskoordinatenzeitreihen ist eine Unstetigkeit bekannt, eine weitere wird identifiziert. Die Unstetigkeiten der SLR-Stationen sind in Tabelle 7 im Anhang angegeben.

In den Zeitreihen der Stationspositionen treten zudem Ausreißer auf. Als Ausreißer werden Stationspositionen definiert, deren Wert das Vierfache des gewichteten RMS (WRMS) der Stationskoordinatenzeitreihe überschreitet.

5.2.2 Vergleich und Kombination der Raubeobachtungsverfahren

In Kapitel 4.3.1 wurde eine Übersicht über die zur Kombination eines zeitabhängigen Referenzrahmens notwendigen Arbeitsschritte gegeben. Kurz gefasst sind das die folgenden:

- Bestimmung der Varianzkomponenten
- Auswahl der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren
- Kombination von Stationsgeschwindigkeiten
- Festlegung des geodätischen Datums.

Die Umsetzung erfolgte ebenso schrittweise.

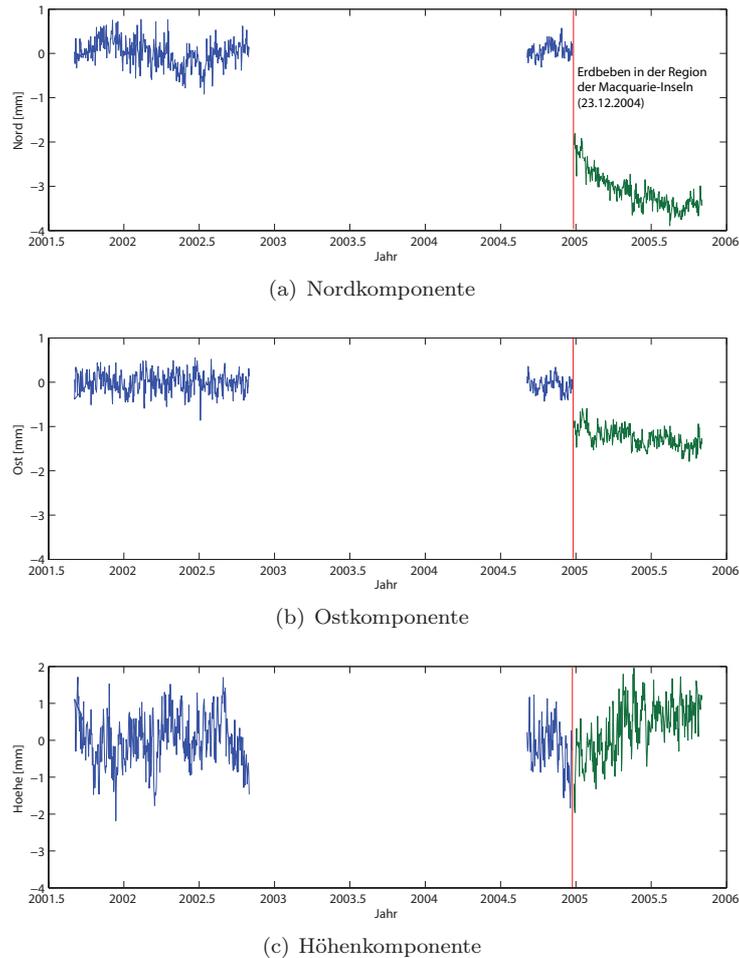


Abbildung 5.7: Zeitreihen der Nord-, Ost- und Höhenkomponente der Position der Station Macquarie Island (MAC1). (Blau: Zeitreihe vor dem Erdbeben, grün: Zeitreihe nach dem Erdbeben)

Zunächst muss geprüft werden, ob die Verfahren bezüglich der Datumparameter, die direkt aus den Beobachtungen der Verfahren bestimmt werden können, systematische Unterschiede aufweisen. Da die Information über die Lage des Massen-zentrums der Erde, die aus GPS erhalten wird, nicht zur Datumfestlegung verwendet werden soll, wird nur der Netzmaßstab von GPS, SLR und VLBI verglichen. Dafür werden die Lösungen der einzelnen Beobachtungsverfahren, deren Berechnung im vorangegangenen Kapitel erläutert wurde, auf den in Kapitel 5.2.1.2 beschriebenen Referenzkoordinatensatz transformiert und die geschätzten Skalierungsfaktoren verglichen. Die Skalierungsfaktoren sind in Tabelle 5.7 angegeben. Die Transformationsparameter für die erste zeitliche Ableitung des Netzmaßstabs sind vernachlässigbar klein und in der Tabelle nicht mit aufgeführt.

Die Werte in Tabelle 5.7 zeigen, dass die für GPS und VLBI geschätzten Skalierungsfaktoren keine signifikante Differenz aufweisen, während sich der für SLR geschätzte Wert signifikant von den für GPS und VLBI erhaltenen Werten unterscheidet. Leider steht für diesen Vergleich keine einheitliche konsistent berechnete Referenzlösung für alle Verfahren zur Verfügung. Da es sich bei der für SLR verwendeten Referenzlösung um eine Lösung handelt, deren Maßstab korrigiert wurde, und diese Lösung möglicherweise Defizite bezüglich des Netzmaßstabs aufweist, soll der SLR-Maßstab dennoch zur Festlegung des Datums der kombinierten Lösung verwendet werden.

Es wird deutlich, dass Unterschiede im Netzmaßstab der verschiedenen Verfahren nur sehr schwer nachgewiesen werden können. Theoretisch bestünde die Möglichkeit, Transformationsparameter einer Ähnlichkeitstransformation zwischen den Netzen der verschiedenen Raumbeobachtungsverfahren direkt zu bestimmen. Dabei müssten die terrestrischen Differenzvektoren auf Ko-lokationsstationen zu den entsprechenden Positionen einer der Lösungen addiert werden, um identische Transformationsstationen zu erhalten. Die Differenzvektoren weisen aber, wie später noch gezeigt wird, teilweise große Diskrepanzen zu den aus den Raumbeobachtungsverfahren bestimmten Koordinatendifferenzen auf. Hinzu kommt, dass die wenigen Ko-lokationsstationen keine gute globale Verteilung haben. Aus einer solchen Transformation werden deswegen keine zuverlässigen Ergebnisse erhalten.

Tabelle 5.7: Geschätzte Skalierungsfaktoren zwischen der GPS-, SLR- und VLBI-Lösung und einem Referenzkoordinatensatz.

Beobachtungsverfahren	Referenz	geschätzte Maßstabsdifferenz [mm]
GPS	IGS05	-2.7 mm \pm 0.3
VLBI	ITRF2005	-1.3 mm \pm 0.7
SLR	ITRF2005 (reskaliert)	2.4 mm \pm 0.9

Der in Tabelle 5.7 angegebene Skalierungsfaktor, der für den Vergleich des GPS-Netzes mit dem IGS05-Koordinatensatz erhalten wird, ist signifikant. Die Ursache für diesen Unterschied im Netzmaßstab ist nicht bekannt. Es kann allerdings vermutet werden, dass die Berechnung des IGS05 aus dem IGT05 durch Transformation von relativen auf absolute Phasenzentrumskorrekturen Unzulänglichkeiten aufweist, da dabei nicht die GPS-Beobachtungen selbst, sondern lediglich die Stationspositionen um eine aus rund 40 Wochen berechnete Differenz korrigiert wurden (siehe Kapitel 5.2.1.2).

5.2.2.1 Bestimmung der Varianzkomponenten

In Kapitel 4.3.1.3 wird das Vorgehen zur Bestimmung der Varianzkomponenten beschrieben. Die Tabelle 5.8 zeigt die für GPS, VLBI und SLR erhaltenen mittleren Standardabweichungen $\bar{\sigma}_{\text{COV}}$ der Stationspositionen. Dem gegenübergestellt sind die Standardabweichungen, die aus den Zeitreihen der Stationspositionen berechneten mittleren Stationspositionen. Da für SLR Wochen- anstelle von Tagesnormalgleichungen vorliegen, wird, um eine Vergleichbarkeit der aus den Zeitreihen erhaltenen Standardabweichungen zu gewährleisten, der für SLR erhaltene Wert korrigiert, indem er mit $\sqrt{\text{Anzahl der Tage}} = \sqrt{7}$ multipliziert wird.

Tabelle 5.8: Bestimmung der Varianzkomponenten

	$\bar{\sigma}_{\text{COV}}$ [mm]	$\bar{\sigma}_{\text{ZR}}$ [mm]	Varianzkomponente
GPS	0.1	0.04	1.0
VLBI	3.0	0.18	1/6.6 ²
SLR	6.7	0.67 $\cdot \sqrt{7}$	1/4.2 ²

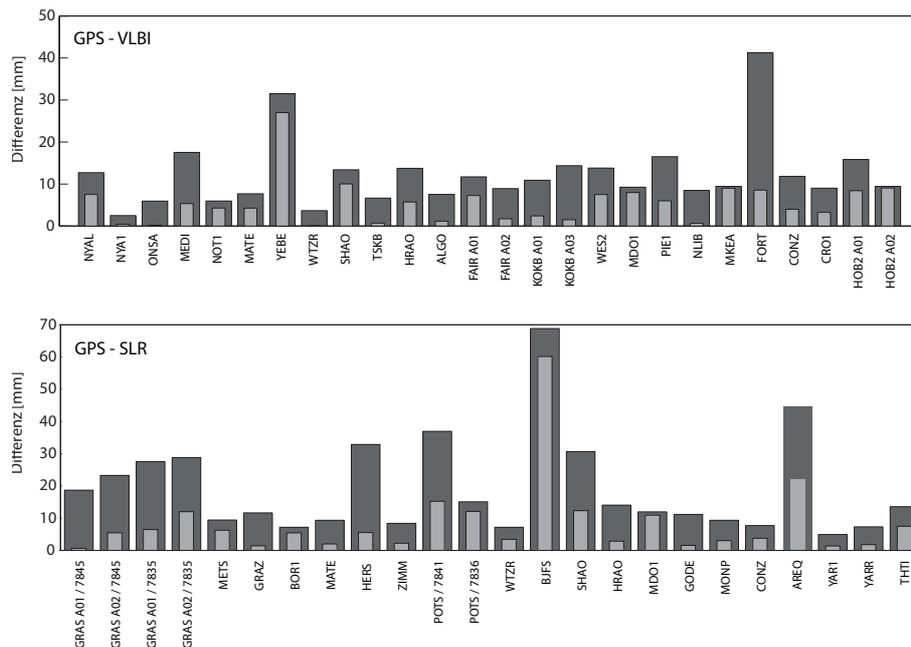
Entsprechend Gleichung 4.89 wird gefordert, dass sich die aus der Ausgleichung erhaltenen Standardabweichungen der einzelnen Beobachtungsverfahren zueinander verhalten sollen, wie die Standardabweichungen, die aus den Zeitreihen abgeleitet werden. Für die relative Gewichtung der Beobachtungsverfahren wird die Varianzkomponente für GPS auf 1.0 festgesetzt und die Varianzkomponenten für VLBI und SLR relativ dazu bestimmt. Die entsprechenden Werte sind in der letzten Spalte der Tabelle 5.8 angegeben.

5.2.2.2 Auswahl der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren

Die Kriterien zur Auswahl der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren sind eine hohe Konsistenz und eine geringe Deformation der kombinierten Lösung (vergl. Kapitel 4.3.1). Als Maß für die Konsistenz werden die mittleren Differenzen zwischen Polkoordinatenzeitreihen herangezogen. Um die Anzahl der Parameter und damit den rechnerischen Aufwand zu reduzieren, werden die Differenzvektoren zur Verknüpfung zweier Beobachtungsverfahren jeweils separat ausgewählt. Die Tabellen 5.4, 5.5 und 5.6 zeigen, dass für eine Kombination von GPS und VLBI insgesamt 25, für die Kombination von GPS und SLR 21, aber für die Kombination von SLR und VLBI nur sieben Ko-lokationsstationen zur Verfügung stehen. Damit wird deutlich, dass GPS als dem Verfahren mit den meisten Ko-lokationen eine wesentliche Rolle bei der Kombination aller Beobachtungsverfahren zukommt. GPS dient als Bindeglied zwischen den übrigen Beobachtungsverfahren. Die Auswahl der Differenzvektoren erfolgt deshalb zunächst für die Kombination von GPS und VLBI beziehungsweise GPS und SLR.

In einem ersten Schritt werden Positionsdifferenzen auf Ko-lokationsstationen aus den Lösungen der Raumbeobachtungsverfahren berechnet. Diese werden mit den terrestrisch bestimmten Differenzvektoren verglichen. Die

Abbildung 5.8 zeigt die Diskrepanzen zwischen den aus den Raumbesichtsungsverfahren und aus terrestrischen Messungen bestimmten Positionsdifferenzen für Ko-lokationen zwischen GPS und VLBI sowie zwischen GPS und SLR. Für die Mehrzahl der Stationen treten Vektordifferenzen von mehr als 5 mm auf. Dies lässt bereits vermuten, dass mit der relativ geringen Anzahl an Ko-lokationsstationen, die zudem keine sehr gute globale Verteilung aufweisen, die innere Genauigkeit von weniger als 1 mm (wie sie das GPS- und das VLBI-Netz erreichen) nicht auf das kombinierte Netz übertragen werden kann. Zusätzlich sind in Abbildung 5.8 die Differenzen dargestellt, die sich aus einem Vergleich der Streckenlängen ergeben (vergl. Abbildung 5.9). Es ist auffällig, dass in den meisten Fällen die Streckendifferenz sehr viel kleiner als die Vektordifferenz ist. Ausgehend von diesem Unterschied lassen sich Rückschlüsse auf mögliche Ursachen der Diskrepanzen zwischen den terrestrisch und den aus den Raumbesichtsungsverfahren bestimmten Differenzvektoren ziehen. Diesem Thema ist das Kapitel 5.2.3.1 gewidmet.



Station	Beobachtungsverfahren	Epoche der Diskontinuität
Grasse	GRAS	10002M006
Fairbanks	GPS	40408M001
	VLBI	40408S002
Kokee Park	GPS	40424M004
		50116M004
Hobart	GPS	50116M004

Abbildung 5.8: Vektordifferenz (dunkelgrau) und Streckendifferenz (hellgrau) zwischen den terrestrisch bestimmten und den aus den Raumbesichtsungsverfahren abgeleiteten Differenzvektoren für Ko-lokationen zwischen GPS- und VLBI-Stationen (oben) und GPS- und SLR-Stationen (unten); vergleiche auch Abbildung 5.9. Die Stationen sind mit den Namen der jeweiligen GPS-Station bezeichnet. Nur wenn sich zwei VLBI- oder SLR-Instrumente auf der Station befinden, sind zusätzlich deren Kennungen angegeben (siehe auch Tabelle 5.4). Die Tabelle in dieser Abbildung gibt eine Übersicht der Diskontinuitäten in den Zeitreihen der Ko-lokationsstationen.

Zunächst wird eine vorläufige Auswahl eines Satzes terrestrischer Differenzvektoren anhand der Vektordifferenzen vorgenommen, wobei diese einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten sollen. Für die Wahl des Grenzwerts wird zunächst von einer absoluten Genauigkeit der Positionen der Stationen von $\sigma_{\text{GPS}} = \sigma_{\text{VLBI}} = 1$ mm und einer Genauigkeit des Differenzvektors von $\sigma_{\text{terrDV}} = 3$ mm ausgegangen. Damit ergibt sich für die Differenz zwischen dem terrestrisch und dem aus den Raumbesichtsungsverfahren bestimmten Differenzvektor eine Genauigkeit von:

$$\sigma_{\Delta\text{DV}} = \sqrt{\sigma_{\text{terrDV}}^2 + \sigma_{\text{GPS}}^2 + \sigma_{\text{VLBI}}^2} = 3.3 \text{ mm.} \quad (5.1)$$

Als Grenzwert für die Auswahl wird der dreifache mittlere Fehler der Differenz ($3 \cdot 3.3 \text{ mm} \approx 10 \text{ mm}$) gewählt.

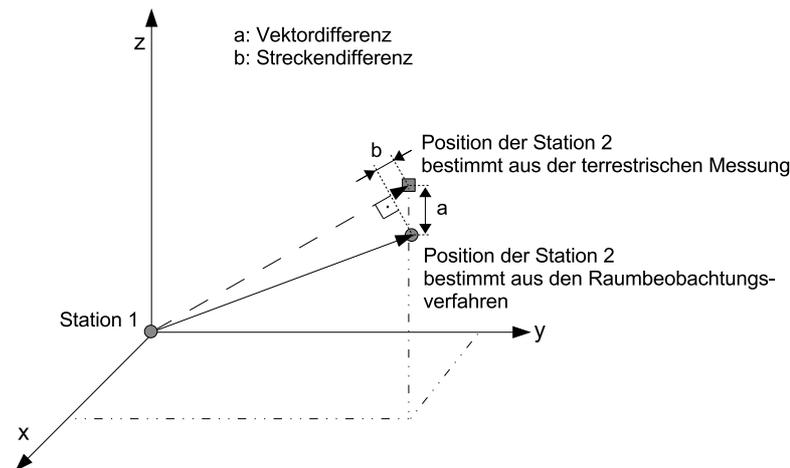


Abbildung 5.9: Vektordifferenz (a) und Streckendifferenz (b) zwischen dem terrestrisch gemessenen und dem aus den Raumbeobachtungsverfahren bestimmten Differenzvektor.

Um den Einfluss der Differenzvektoren auf die Konsistenz und die Deformation der kombinierten Lösung besser untersuchen zu können, werden vier Gruppen an Differenzvektoren bestimmt, die im Fall der Kombination von GPS und VLBI innerhalb der Grenzwerte 8 mm, 9 mm, 10 mm und 15 mm und im von GPS und SLR innerhalb von 9 mm, 10 mm, 12 mm und 15 mm, mit den Lösungen der Raumbeobachtungsverfahren übereinstimmen. Für die genaue Festlegung der Grenzwerte wird darauf geachtet, dass für aufeinanderfolgende Grenzwerte eine unterschiedliche Anzahl an Differenzvektoren ausgewählt wird. Die Tabellen 5.9 und 5.10 geben eine Übersicht über die ausgewählten Differenzvektoren sowie deren globale Verteilung.

Für die Kombination von GPS und VLBI werden für jede der vier Differenzvektor-Gruppen jeweils vier Kombinationen gerechnet und die Differenzvektoren mit verschiedenen a priori Standardabweichungen (2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm und 0.1 mm) eingeführt. In Abbildung 5.10 sind die resultierenden mittleren Poldifferenzen und die mittleren quadratischen Residuen aus der 14-Parameter-Ähnlichkeitstransformation des kombinierten Netzes auf das Netz der VLBI-Lösung dargestellt. Die Transformation des kombinierten Netzes auf das GPS-Netz ergab, dass dieses in der Kombination nur minimal deformiert wird. Grund dafür ist die vier- bis fünfmal höhere innere Genauigkeit des GPS-Netzes im Vergleich zum VLBI-Netz (siehe Kapitel 5.2.2.1), die auf die höhere Stationsdichte und die sehr viel größere Anzahl an Beobachtungen zurückzuführen ist. Für die Auswahl der Differenzvektoren wird deshalb nur die Deformation des VLBI-Netzes herangezogen.

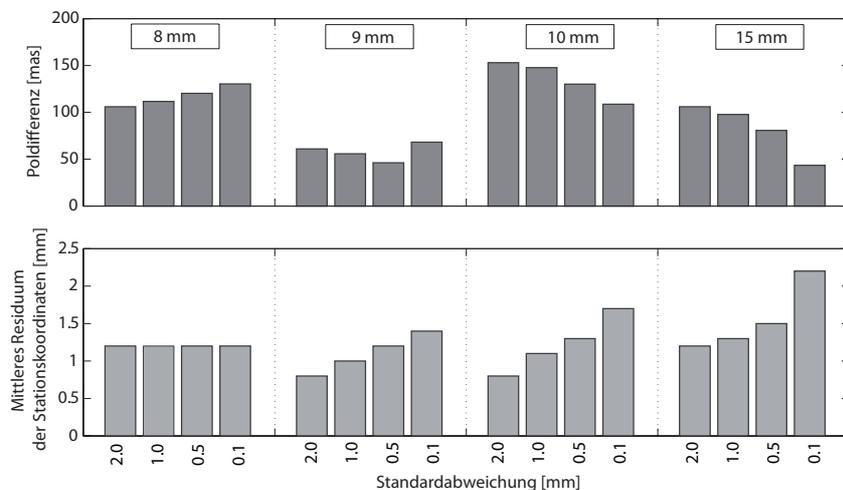


Abbildung 5.10: Kombination von GPS und VLBI unter Verwendung verschiedener Differenzvektoren und a priori Standardabweichungen der Differenzvektoren: mittlere Differenz der Polkoordinaten (oben) und mittleres quadratisches Residuum der Transformation (unten).

Tabelle 5.9: Auswahl der terrestrischen Differenzvektoren für die Kombination GPS-VLBI (E: Epoche, zu welcher dieser Differenzvektor beobachtet wurde, ist bekannt). Für die Bezeichnung der Position der Stationen wird jeweils die Kurzbezeichnung und die Lösungsnummer angegeben. Die DOMES-Nummern können der Tabelle 5.4 entnommen werden.

Station	Ko-lokationsstationen		8 [mm]	9 [mm]	10 [mm]	15 [mm]
	GPS	VLBI				
Europa						
Ny Ålesund	NYAL A1	7331 A1				X
	NYA1 A1	7331 A1	X	X	X	X
Onsala	ONSA A1	7213 A1	X	X	X	X
Noto	NOT1 A1	7547 A1 E	X	X	X	X
Matera	MATE A1	7243 A1 E	X	X	X	X
Wettzell	WTZR A1	7224 A1 E	X	X	X	X
Asien						
Shanghai	SHAO A1	7227 A1				X
Tsukuba	TSKB A1	7345 A1	X	X	X	X
Afrika						
Hartebeesthoek	HRAO A1	7232 A1				X
Nord-Amerika						
Algonquin Park	ALGO A1	7282 A1 E	X	X	X	X
Fairbanks	FAIR A1	7225 A1				X
	FAIR A2	7225 A2		X	X	X
Kokee Park	KOKB A1	7298 A1				X
	KOKB A3	7298 A1				X
Westford	WES2 A1	7209 A1 E				X
Fort Davis	MDO1 A1	7613 A1			X	X
North Liberty	NLIB A1	7612 A1 E		X	X	X
Mauna Kea	MKEA A1	7617 A1			X	X
Mittel- und Süd-Amerika						
Conzeption	CONZ A1	7640 A1 E				X
Saint Croix	CRO1 A1	7615 A1			X	X
Australien						
Hobart	HOB2 A2	7242 A1			X	X
Anzahl der Differenzvektoren (gesamt)			7	9	13	21

Die Abbildung 5.10 zeigt, dass unter Verwendung des Satzes an Differenzvektoren, der mit einem Grenzwert von 9.0 mm ausgewählt wurde, die höchste Konsistenz und die geringste Deformation des kombinierten Netzes erreicht wird. Der kleinste Wert für die mittlere Polkoordinatendifferenz liegt bei etwas weniger als $50 \mu s$. Umgerechnet auf eine Entfernung auf der Erdoberfläche entspricht dieser Wert etwa 1.5 mm. Die mittlere Deformation für diese Lösung beträgt etwa 1 mm. Bei einer geringeren Anzahl an Differenzvektoren wird die globale Verteilung (siehe Tabelle 5.9) deutlich schlechter und die Poldifferenzen nehmen zu. Auch die Deformation des Netzes wird trotz des kleineren Grenzwerts von 8 mm größer. Das ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass ein einzelner Differenzvektor einen größeren Einfluss auf das Netz hat. Wird der Grenzwert größer gewählt, so nehmen die Polkoordinatendifferenzen zwar mit kleiner werdender a priori Standardabweichung ab, jedoch nimmt die Deformation des VLBI-Netzes stark zu. Die Lösungen, die unter Verwendung des Satzes an Differenzvektoren berechnet werden, der mit einem Grenzwert von 9.0 mm ausgewählt wird, unterscheiden sich kaum. Aufgrund der kleinen Poldifferenz und der im Vergleich zu den Lösungen mit kleinerer a priori Standardabweichung etwas geringeren Deformation, wird für die folgenden Schritte die a priori Standardabweichung von 1.0 mm für die Differenzvektoren verwendet.

Es wird weiterhin untersucht, ob zusätzliche Differenzvektoren, die mit einem größeren Grenzwert ausgewählt und mit einer größeren a priori Standardabweichung eingeführt werden, die Konsistenz der Lösung verbessern können. Dabei wird anhand der Ergebnisse der ersten Kombinationslösung und unter Verwendung eines Grenzwerts von 15.0 mm ein Satz von weiteren 12 Differenzvektoren ausgewählt. Diese werden mit Standardabweichungen von 1.0 mm, 3.0 mm, 5.0 mm und 10.0 mm in die Kombination eingeführt. In der Tabelle 5.11 sind die Ergebnisse für die Polkoordinatendifferenzen und die Deformationen zusammengefasst.

Tabelle 5.10: Auswahl der terrestrischen Differenzvektoren für die Kombination GPS-SLR (E: Epoche, zu welcher dieser Differenzvektor beobachtet wurde, ist bekannt.) Für die Bezeichnung der Position der Stationen wird jeweils die Kurzbezeichnung und die Lösungsnummer angegeben. Die DOMES-Nummern können der Tabelle 5.5 entnommen werden.

Station	Ko-lokationsstationen		9 [mm]	10 [mm]	12 [mm]	15 [mm]
	GPS	SLR				
Europa						
Borowiec	BOR1 A1	7811 A1	X	X	X	X
Graz	GRAZ A1	7839 A1			X	X
Matera	MATE A1	7941 A1		X	X	X
Metsahovie	METS A1	7806 A1		X	X	X
Zimmerwald	ZIMM A1	7810 B1	X	X	X	X
Wetzell	WTZR A1	8834 A1	X	X	X	X
Afrika						
Hartebeesthoek	HRAO A1	7501 A1 E				X
Nord-Amerika						
Washington	GODE A1	7105 A1 E			X	X
Fort Davis	MDO1 A1	7080 A1 E			X	X
Monument Peak	MONP A1	7110 A1		X	X	X
Mittel- und Süd-Amerika						
Conception	CONZ A1	7405 A1 E	X	X	X	X
Australien						
Yarragadee	YAR1 A1	7090 A1	X	X	X	X
	YARR A1	7090 A1 E	X	X	X	X
Süd-Pazifik						
Tahiti	THTI A1	7124 A1				X
Anzahl der Differenzvektoren (gesamt)			6	9	12	14

Tabelle 5.11: Mittlere Differenzen der Polkoordinaten und mittlere quadratische Residuen der Transformation bei Einführung weiterer Differenzvektoren mit einem Grenzwert von 15.0 mm.

a priori Standardabweichung der Differenzvektoren [mm]	Polkoordinatendifferenz [μs]	Mittl. quadr. Residuum der Transformation [mm]
1.0	80.3	1.2
3.0	68.6	1.2
5.0	61.3	1.1
10.0	56.7	1.1

Es zeigt sich, dass auch bei Verwendung größerer Standardabweichungen mit Hilfe zusätzlich ausgewählter Differenzvektoren keine Verbesserung der Konsistenz erreicht werden kann. Deshalb werden für die Kombination nur die mit einem Grenzwert von 9.0 mm ausgewählten Differenzvektoren verwendet.

Um geeignete a priori Standardabweichungen der Differenzvektoren für die Kombination von GPS und SLR zu finden, werden die vier Gruppen ausgewählter Differenzvektoren ebenfalls mit vier verschiedenen a priori Standardabweichungen (0.1 mm, 1.0 mm, 3.0 mm und 5.0 mm) in die Kombination eingeführt. Im Gegensatz zur Kombination von GPS und VLBI ergibt sich durch eine kleine Änderung der a priori Standardabweichungen kaum eine Änderung der kombinierten Lösung. Deshalb wurde die Spannbreite der Standardabweichungen größer gewählt. Die Abbildung 5.11 zeigt die für die verschiedenen Lösungen erhaltenen mittleren Poldifferenzen sowie das mittlere quadratische Residuum der Transformation der kombinierten Lösung auf die SLR-Lösung.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass bei Verwendung von a priori Standardabweichungen ≥ 1.0 mm die Deformation des SLR-Netzes mehr oder weniger gleich ist. Dass die Deformation auch bei Verwendung sehr großer Standardabweichungen nicht den Wert Null erreicht, ist darauf zurückzuführen, dass auch die Kombination der Geschwindigkeiten auf Ko-lokationsstationen zu einer minimalen Deformation des Netzes führt. Die mittleren Polkoordinatendifferenzen, die für verschiedene Grenzwerte und unter Verwendung einer a priori Standardabweichung von 3 mm erhalten werden, unterscheiden sich nur geringfügig. Sie erreichen Werte zwischen 67 μs

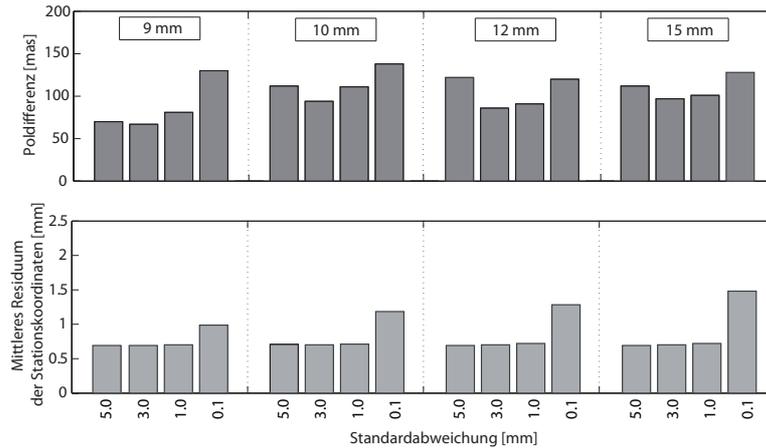


Abbildung 5.11: Kombination von GPS und SLR unter Verwendung verschiedener Differenzvektoren und a priori Standardabweichungen der Differenzvektoren: mittlere Differenz der Polkoordinaten (oben) und mittleres quadratisches Residuum der Transformation (unten).

Tabelle 5.12: Anzahl der kombinierten Geschwindigkeiten.

Ko-lokation	Anzahl der möglichen Kombinationen	Anzahl der kombinierten Geschwindigkeiten
GPS-VLBI	32	26
GPS-SLR	32	17
VLBI-SLR	7	3

und $97 \mu\text{as}$, was einer Entfernung auf der Erdoberfläche von 2.1 mm beziehungsweise 3.0 mm entspricht. Die Auswahl eines Satzes an Differenzvektoren anhand der vorgegebenen Kriterien ist deshalb schwierig. Die kleinste mittlere Polkoordinatendifferenz wird für die Lösung mit einem Grenzwert von 9 mm und einer a priori Standardabweichung von 3 mm für die Differenzvektoren erhalten. Jedoch erfolgt die Kombination der Stationsnetze in dieser Lösung nur über fünf Ko-lokationsstationen. Deshalb wird im Folgenden die Lösung mit einem Grenzwert von 12 mm verwendet. Sie weist ebenfalls eine kleine Poldifferenz auf, jedoch sind elf global gut verteilte Ko-lokationsstationen verfügbar. Die Einführung weiterer, mit einem größeren Grenzwert ausgewählter Differenzvektoren, wie sie für die Kombination von GPS und VLBI untersucht wurde, ist für die Kombination von GPS und SLR ebenfalls nicht erfolgreich: Weitere Differenzvektoren können erst ab einem Grenzwert von 30 mm ausgewählt werden und führen zu keiner Verbesserung der Kombinationsergebnisse.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass teilweise große Diskrepanzen zwischen den terrestrischen Differenzvektoren und den aus den Raubeobachtungsverfahren erhaltenen Koordinatendifferenzen auftreten. Eine Analyse dieser Diskrepanzen erfolgt in Kapitel 5.2.3.1.

5.2.2.3 Kombination der Stationsgeschwindigkeiten

Geschwindigkeiten von Ko-lokationsstationen werden kombiniert, wenn sie keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Die Tabelle 5.12 gibt eine Übersicht über die Anzahl der kombinierten Geschwindigkeiten. Die Anzahl der prinzipiell möglichen und der ausgewählten Ko-lokationen sind jeweils getrennt für die Ko-lokationen GPS-VLBI, GPS-SLR und VLBI-SLR angegeben. Insgesamt können die Geschwindigkeiten nur für drei VLBI-SLR-Ko-lokationen gleichgesetzt werden. Für die Kombination von GPS mit SLR und VLBI steht jeweils eine wesentlich größere Anzahl an Ko-lokationen zur Verfügung, für die die Geschwindigkeiten kombiniert werden. Diese Werte zeigen, dass eine alleinige Kombination von SLR und VLBI nur eingeschränkt möglich ist, und dass GPS einen wesentlichen Beitrag zur Verknüpfung von SLR und VLBI liefert.

5.2.2.4 Festlegung des geodätischen Datums

In Kapitel 4.3.1.6 wurde die Festlegung des Datums für die vorliegende Lösung diskutiert. Sie wird wie folgt umgesetzt: Der Koordinatenursprung und dessen erste zeitliche Ableitung werden ausschließlich aus SLR-Beobachtungen bestimmt. Die Festlegung des Koordinatenursprungs erfolgt damit konsistent zu den Konventionen des IERS zur Realisierung des ITRS (siehe Kapitel 2.1). Wie in Kapitel 5.2.1 gezeigt wurde, kann der aus GPS bestimmte Koordinatenursprung wegen des Auftretens periodischer Effekte, die aus Unzulänglichkeiten der Modellierung der Beobachtungen resultieren, nicht für die Datumsfestlegung verwendet werden.

Ein signifikanter Unterschied im Netzmaßstab der einzelnen Verfahren konnte nicht gesichert nachgewiesen werden. Deshalb wird der Maßstab des kombinierten Netzes aus den Beobachtungen aller drei Verfahren VLBI, SLR und GPS bestimmt. Während in den bisherigen Realisierungen des ITRS der aus GPS bestimmte Maßstab nicht für die Datumsfestlegung verwendet wurde, da er sich signifikant von dem aus SLR und VLBI bestimmten Maßstab unterschied (ALTAMIMI *et al.* 2002), konnten die in dieser Arbeit verwendeten GPS-Beobachtungen für die Maßstabsbestimmung herangezogen werden. Den wichtigsten Anteil an der verbesserten Maßstabsbestimmung aus GPS hat die Verwendung absoluter Phasenzentrumskorrekturen sowohl für die GPS-Empfangs- als auch die Satellitenantennen.

Die Festlegung der Orientierung erfolgt mit Hilfe einer NNR-Bedingung bezüglich des IGS05 unter Verwendung der ausgewählten GPS-Referenzstationen (Kapitel 5.2.1.2). Die Orientierung der Lösung entspricht damit der des ITRF2005.

5.2.3 Validierung des zeitabhängigen Referenzrahmens

5.2.3.1 Analyse der Diskrepanzen zwischen den terrestrisch bestimmten Differenzvektoren und den Lösungen der Raubeobachtungsverfahren

Diskrepanzen, die zwischen den terrestrisch bestimmten Differenzvektoren und den Koordinatenlösungen der Raubeobachtungsverfahren auftreten, können eine Vielzahl von Ursachen haben. Da diese sowohl auf der Seite der Messung und Auswertung der terrestrischen Beobachtungen, als auch auf der der Raubeobachtungsverfahren gesucht werden müssen, ist eine Identifizierung sehr schwierig. Es werden jedoch im Folgenden einige maßgebliche Effekte genannt und diskutiert, die zu Diskrepanzen führen:

- Im Fall eines großen Abstands zwischen den Referenzpunkten der Beobachtungsverfahren führen Diskrepanzen zwischen terrestrisch und aus den Raubeobachtungsverfahren bestimmten Differenzvektoren, die senkrecht zur Richtung des Differenzvektors auftreten, zu großen Unterschieden zwischen der Vektordifferenz und der Streckendifferenz (siehe Abbildung 5.9).
- Fehler in der Orientierung des terrestrischen Differenzvektors können zu großen Unterschieden zwischen der Vektordifferenz und der Streckendifferenz führen.
- Unterschiede im geodätischen Datum der Stationsnetze verschiedener Beobachtungsverfahren führen zu systematischen Diskrepanzen auf allen Ko-lokationsstationen.
- Stationen unterliegen Höhenvariationen aufgrund von Änderungen der Atmosphärenauflast. Ursächlich für die Atmosphärenauflast ist die Änderung des Luftdrucks. Da ein Zusammenhang zwischen dem Luftdruck und der Wolkenbedeckung besteht und SLR-Stationen nur bei nicht bedecktem Himmel beobachten können, sind die Höhen der SLR-Stationen im Vergleich zu GPS und VLBI systematisch verfälscht.

Für den teilweise großen Unterschied zwischen Vektordifferenz und Streckendifferenz (Abbildung 5.8) sind zwei Ursachen denkbar: Zum einen wirkt sich eine Differenz zwischen terrestrischer Messung und den Raubeobachtungsverfahren, die senkrecht oder nahezu senkrecht zur Richtung des terrestrischen Differenzvektors auftritt und klein ist im Vergleich zur Länge des Differenzvektors, stark auf die Vektordifferenz aus, hat aber kaum Einfluss auf die Länge des Vektors. Die Differenz der Streckenlängen ist folglich im Vergleich zur Vektordifferenz sehr klein. Abbildung 5.9 verdeutlicht das: Die Differenz in z-Richtung wirkt sich nur minimal auf die Länge aus, da sie beinahe senkrecht zur Verbindungslinie zwischen den Instrumenten auftritt. In der Praxis treten die größten Differenzen meist zwischen den Höhenkomponenten der in das lokale Horizontsystem der Stationen transformierten Differenzvektoren auf. Ein Grund dafür ist die schlechtere Bestimmbarkeit der Höhenkomponenten aufgrund der Beobachtungsverteilung und die sich daraus ergebenden hohen Korrelation mit anderen

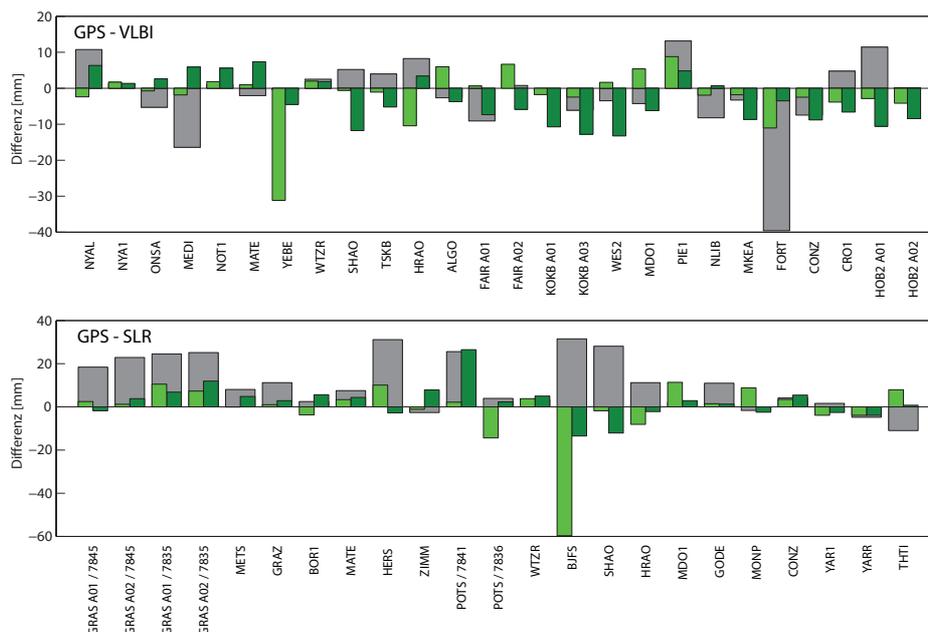


Abbildung 5.12: Diskrepanzen zwischen terrestrischen Differenzvektoren und den Koordinatendifferenzen der Raumbeobachtungsverfahren in Nordrichtung (hellgrün), Ostrichtung (dunkelgrün) und Höhenrichtung (grau) für GPS-VLBI-Ko-lokationen (oben) und GPS-SLR-Ko-lokationen (unten). Zu beachten sind die unterschiedlichen Achsskalierungen.

geschätzten Parametern. In Abbildung 5.12 sind die Diskrepanzen in Nord-, Ost- und Höhenrichtung dargestellt. Insbesondere für die GPS-SLR-Ko-lokationen sind große Diskrepanzen in der Höhenkomponente zu verzeichnen.

Eine zweite Möglichkeit für den großen Unterschied zwischen der Vektordifferenz und der Differenz der Streckenlängen ist, dass der Differenzvektor nicht im ITRF2000 orientiert, sondern systematisch gegenüber dessen Achsen verdreht ist (siehe auch Kapitel 5.1.2).

Die beiden genannten Effekte wirken sich in gleicher Weise auf die Diskrepanzen zwischen den Differenzvektoren aus und können nicht voneinander unterschieden werden.

Da die Streckendifferenz für viele der Ko-lokationen so viel kleiner ist als die Vektordifferenz, liegt der Gedanke nahe, anstelle der terrestrischen Differenzvektoren lediglich die Strecken in die Kombination einzuführen. KRÜGEL und ANGERMANN (2007) studieren diese Möglichkeit für die Kombination globaler GPS- und VLBI-Netze. Dabei zeigt sich jedoch, dass die Anzahl und die globale Überdeckung der bisher verfügbaren Ko-lokationsstationen nicht ausreicht, um eine stabile Kombinationslösung zu berechnen. Die Ursache ist der sehr viel geringere Informationsgehalt der Streckenlängen im Vergleich zu den Differenzvektoren. Es wird weiterhin diskutiert, inwieweit die Installation von zwei GPS-Stationen pro VLBI-Station zu einer Stabilisierung der Kombination auf Basis von Streckendifferenzen führt. Es wird gezeigt, dass dadurch zwar eine deutlich höhere Stabilität erreicht wird, diese jedoch für einen hochgenauen Referenzrahmen noch nicht ausreichend ist, selbst dann nicht, wenn alle Stationen des VLBI-Netzes eine Ko-lokation zu zwei GPS-Stationen aufwiesen. Es sind also mindestens drei oder mehr GPS-Stationen nötig, die gut um die jeweilige VLBI-Station verteilt sind, um mit diesem Ansatz dieselbe Genauigkeit zu erreichen, wie sie beim Einführen von Differenzvektoren erhalten wird.

In Abbildung 5.12 wurden die Diskrepanzen zwischen den terrestrisch und den aus den Raumbeobachtungsverfahren bestimmten Differenzvektoren aufgespalten in Nord-, Ost- und Höhenkomponente dargestellt. Während für die Ko-lokationen GPS-VLBI die Diskrepanzen keine Systematiken aufweisen, scheinen die Widersprüche für die GPS-SLR-Ko-lokationen in allen drei Komponenten zumindest teilweise systematisch zu sein, da sie fast ausschließlich dasselbe Vorzeichen haben. Eine Differenz im Netzmaßstab, wie sie zu Beginn des Kapitels 4.3.1 für GPS und SLR diskutiert wird, führt zu systematischen Diskrepanzen. Da die hier dargestellten Werte jedoch von Station zu Station unterschiedlich groß sind, kann nicht unmittelbar auf eine Differenz im Netzmaßstab geschlossen werden.

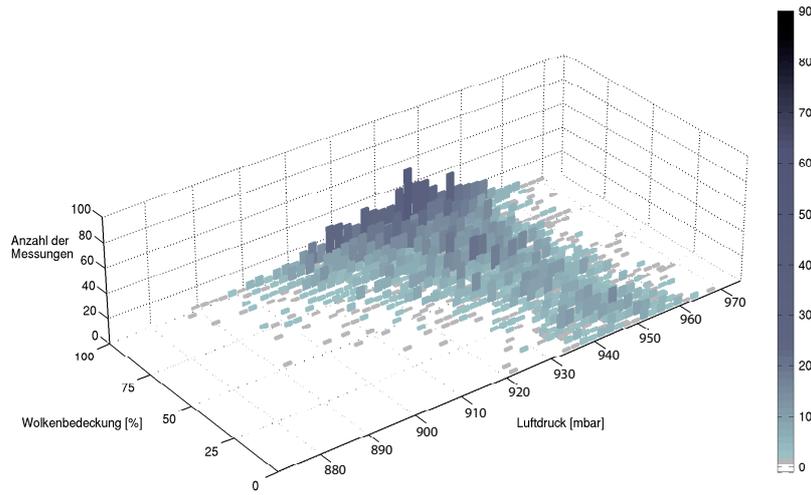
Alle Beobachtungsstationen unterliegen Höhenvariationen aufgrund atmosphärischer Auflaständerungen (Kapitel 2.4.4). Ursächlich für die Atmosphärenauflast an einer Station ist die Änderung des Luftdrucks an dieser Station und in ihrer Umgebung. Im Zusammenhang mit dem Luftdruck steht auch die Wolkenbedeckung. Ein Tiefdruckgebiet bildet sich aus, wenn warme feuchte Luft aufsteigt. Die aufsteigende Luft kühlt ab, der ent-

haltene Wasserdampf kondensiert, und es bilden sich Wolken. Umgekehrt entsteht ein Hochdruckgebiet, wenn kühle Luftmassen absinken. Während des Absinkens erwärmt sich die Luft und es kommt zur Wolkenauflösung (MALBERG 2002). Ein Hochdruckgebiet kann zwar nicht generell mit schwacher und umgekehrt ein Tiefdruckgebiet mit starker Bewölkung in Verbindung gebracht werden, dennoch besteht für Regionen mit einer relativ hohen mittleren Luftfeuchtigkeit (keine Wüstenregion) dennoch ein Zusammenhang zwischen niedrigen Luftdruckwerten und der Wolkenbedeckung. Die Abbildung 5.13 veranschaulicht das: Für drei Stationen wurde die tägliche Wolkenbedeckung über dem Luftdruck aufgetragen. Die Höhe der Balken gibt an, wie häufig ein bestimmter Wolkenbedeckungsgrad bei einem bestimmten Luftdruck auftritt. Da für die geodätischen Stationen selbst keine Informationen über die Wolkenbedeckung vorliegen, wurden Beobachtungsstationen des deutschen Wetterdienstes ausgewählt. Es wurden Daten von Januar 1991 bis Oktober 2007 verwendet, die vom Deutschen Wetterdienst unter <http://www.dwd.de/> (06.06.2008) zur Verfügung gestellt werden. Für alle drei betrachteten Stationen wird deutlich, dass niedrige Luftdruckwerte zwar im Verhältnis sehr selten vorkommen, gleichzeitig aber immer starke Bewölkung auftritt. Es scheint aber, dass dieser Effekt mit zunehmender Höhe der Station stärker ausgeprägt ist.

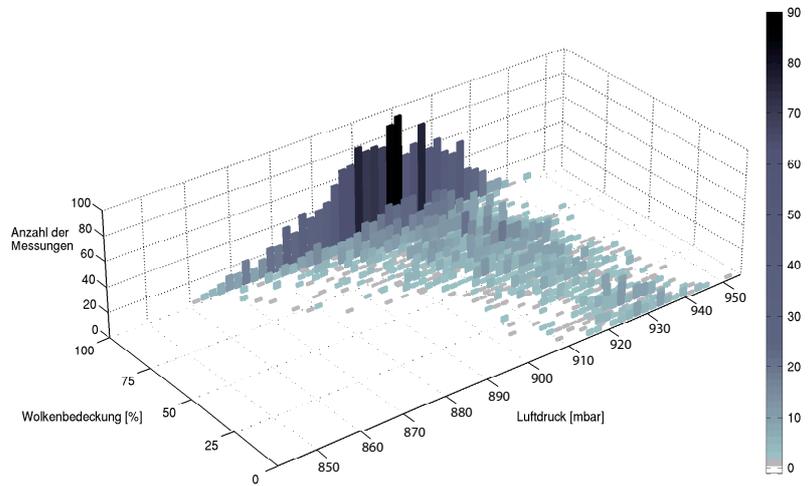
Während GPS- und VLBI-Stationen weitgehend unabhängig von den Wetterbedingungen sind, können mit SLR als einzigem optischen unter den hier betrachteten Raumbesichtungsverfahren bei bedecktem Himmel, also vermehrt bei niedrigem Luftdruck, nur eingeschränkt Beobachtungen durchgeführt werden. Der niedrige Luftdruck führt zu einer Entlastung der Erdkruste und damit einer Hebung der Station relativ zu einer mittleren Stationshöhe. Dadurch ergeben sich auch im langjährigen Mittel systematische Differenzen zwischen den Höhen der SLR-Stationen und den Stationen anderer Raumbesichtungsverfahren. Dieser Effekt wird auch als *blue sky effect* bezeichnet (OTSUBO *et al.* 2004). Dies führt zu einer systematischen Diskrepanz zwischen den terrestrischen und den aus dem Raumbesichtungsverfahren berechneten Differenzvektoren für alle Ko-lokationen an denen SLR beteiligt ist. Um die Größe dieser Diskrepanz abschätzen zu können, werden alle für eine SLR-Station verfügbaren Luftdruckwerte eines bestimmten Zeitraums gemittelt. Dem gegenübergestellt wird das Mittel aller Luftdruckwerte der Epochen, an welchen SLR-Beobachtungen durchgeführt wurden. Die Differenz zwischen beiden mittleren Luftdruckwerten kann mit Hilfe eines Regressionsfaktors in eine Höhendifferenz umgerechnet werden (siehe Kapitel 2.4.4). Um den Einfluss von Ausreißern und instrumentell bedingten Datenlücken auf die Ergebnisse gering zu halten, wird ein Zeitraum von 6 Jahren (2001.0 bis 2007.0) gewählt. Zudem werden für diese Untersuchung nur Stationen verwendet, die in dem genannten Zeitraum keine großen Beobachtungsausfälle aufweisen. Als Luftdruckdaten werden Analysen des ECMWF herangezogen, die in einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ und einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden vorliegen. Diese Daten werden den auf der Station gemessenen Werten vorgezogen, da sie frei von kurzzeitigen oder sehr lokalen Luftdruckschwankungen sind. Es wird angenommen, dass die Erdkruste ohne zeitliche Verzögerung auf die sechsstündig aufgelösten Luftdruckschwankungen reagiert (T. van Dam, 2008, persönliche Mitteilung). Die Abbildung 5.14 zeigt die Luftdruckzeitreihen für die Stationen Wettzell, Graz, Zimmerwald und Yarragadee. Die Luftdruckwerte der Epochen, zu denen SLR-Beobachtungen durchgeführt wurden, sind rot markiert. Es ist gut zu erkennen, dass bei besonders niedrigem Luftdruck keine SLR-Messungen stattfinden. Während die europäischen Stationen relativ häufig nicht beobachten können, hat die australische Station Yarragadee eine sehr hohe Beobachtungsdichte.

Die Abbildung 5.15 zeigt global die mittlere jährliche Wolkenbedeckung in Prozent mit einer räumlichen Auflösung von $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Die dargestellten Bedeckungsgrade wurden innerhalb des Projekts *International Satellite Cloud Climatology Project* (ICCP-D2) der Nasa erfasst und auf der Webseite <http://isccp.giss.nasa.gov> (19.03.2008) zur Verfügung gestellt. Alle im Folgenden betrachteten SLR-Stationen sind durch Kreise gekennzeichnet. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen (zum Beispiel zwischen den Stationen in Europa und der australischen Station Yarragadee) sind gut zu erkennen. Mit Blick auf die Beobachtungsdichte der Stationen in Abbildung 5.14 erscheinen die Bedeckungsgrade etwas zu groß. Beispielsweise MEERKÖTTER *et al.* (2004) geben jedoch für Europa Wolkenbedeckungsgrade an, die mit denen in Abbildung 5.15 vergleichbar sind.

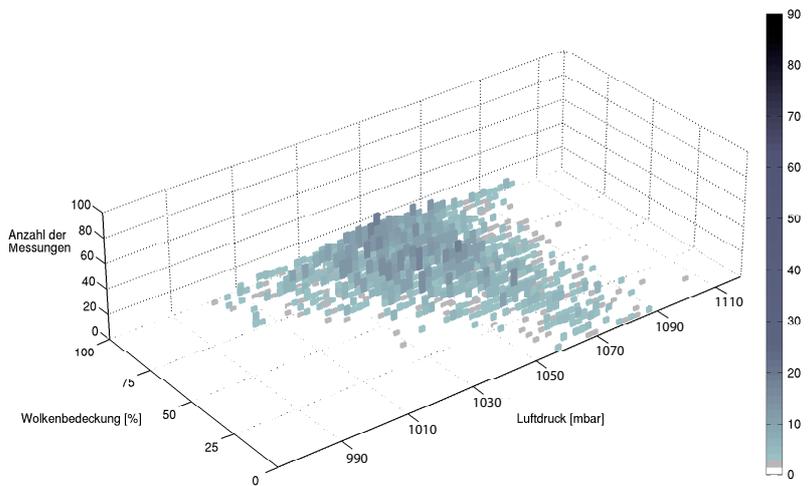
In Tabelle 5.13 ist für jede der betrachteten SLR-Stationen die Differenz ($\bar{p} - \bar{p}_{\text{SLR}}$) zwischen dem Mittelwert aller Luftdruckdaten und dem Mittelwert der Luftdruckdaten zu SLR-Beobachtungsepochen angegeben. Für die Umrechnung dieser Differenzen in Höhenunterschiede werden die Regressionskoeffizienten verwendet, die vom *Special Bureau for Loading* des IERS zur Verfügung gestellt werden (<http://www.sbl.statkart.no/products/research/regression>, 20.12.2007). Sie sind ebenfalls in der Tabelle mit angegeben. Für Stationen, die weniger als 50 km von der Küste entfernt liegen und in der Tabelle separat dargestellt sind, sind die Regressionsfaktoren kleiner als für die übrigen Stationen. Der Grund dafür ist, dass infolge der invers-barometrischen Reaktion des Ozeans für küstennahe Stationen nur geringe Höhenvariationen wegen Luftdruckschwankungen auftreten. Die Station Yarragadee, die etwa 50 km von der Küste entfernt liegt, scheint bereits nicht mehr nachweisbar vom invers-barometrischen Effekt beeinflusst zu sein, da sie einen Regressionskoeffizienten besitzt, der dieselbe Größenordnung hat, wie die Koeffizienten der Stationen, die weiter im Landesinneren liegen.



(a) Hohenpeißenberg (977 m)



(b) Fichtelberg (1213 m)



(c) Helgoland (4 m)

Abbildung 5.13: Wolkenbedeckung in Abhängigkeit vom Luftdruck für drei Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Insgesamt wurden etwa 6000 Luftdruckbeobachtungen je Station verwendet.

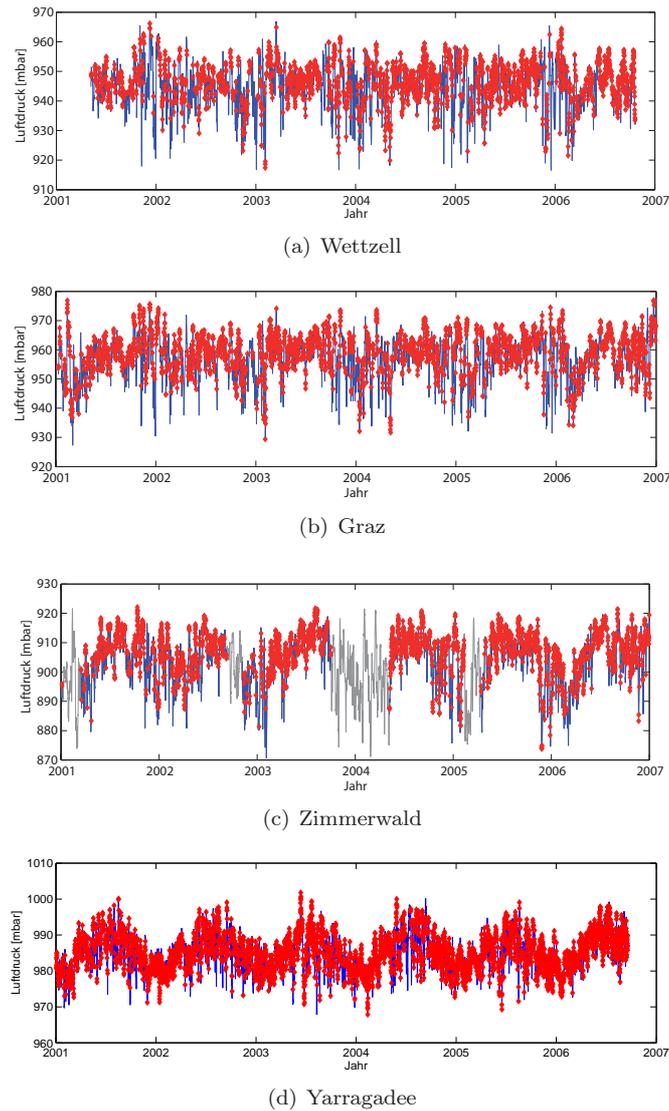


Abbildung 5.14: Zeitreihen des Luftdrucks für die SLR-Stationen Wettzell, Graz, Zimmerwald und Yarragadee aus ECMWF-Analysen (blau). Die SLR-Beobachtungsepochen sind durch rote Punkte gekennzeichnet.

Die berechneten Höhendifferenzen zeigen, dass die Diskrepanz zwischen den Höhen der SLR-Stationen und den übrigen Stationen im langjährigen Mittel bis zu 1.3 mm erreichen kann, wenn die Station mehr als 50 km von der Küste entfernt liegt. Stationen, die sich in Küstennähe befinden, erfahren nur geringe Höhenvariationen wegen Luftdruckschwankungen, weswegen auch die Verfälschung der SLR-Höhe nur sehr kleine Werte von weniger als 0.8 mm annimmt.

Bei der Interpretation der Höhendifferenzen sollte bedacht werden, dass Beobachtungsausfälle bei SLR-Stationen nicht wetterbedingt sein müssen. Als Beispiel kann die Station Zimmerwald dienen. Die Abbildung 5.14 zeigt, dass diese Station über längere Zeiträume nicht beobachtet hat. Sie wird dennoch in die Studie einbezogen, um den Effekt von Beobachtungsausfällen auf die Höhenkomponente abschätzen zu können. Die Ursachen für die Beobachtungsausfälle waren meist technische Probleme (siehe http://ilrs.gsfc.nasa.gov/stations/sitelist/ZIML_general.html, 02.01.2008). In der Tabelle 5.13 sind zwei Luftdruck- und Höhendifferenzen für diese Station angegeben, wobei einmal alle Luftdruckwerte im Zeitraum 2001.0 bis 2007.0 berücksichtigt werden und einmal die Zeiträume, die in Abbildung 5.14 grau markiert sind, nicht einbezogen werden. Die berechneten Höhenanomalien differieren um 1.4 mm. Der Wert entspricht etwa der maximalen Höhenanomalie, die für die hier betrachteten Stationen erhalten wird. Dies zeigt, dass längere Beobachtungslücken Fehler in der Höhenkomponente erzeugen können, die dieselbe Größenordnung haben, wie die durch Wetter bedingten Beobachtungsausfälle. Dies trifft selbstverständlich für die Beobachtungsstationen aller Raumbeobachtungsverfahren zu. Je länger aber die Beobachtungszeit ist, je kürzer die Beobachtungsaus-

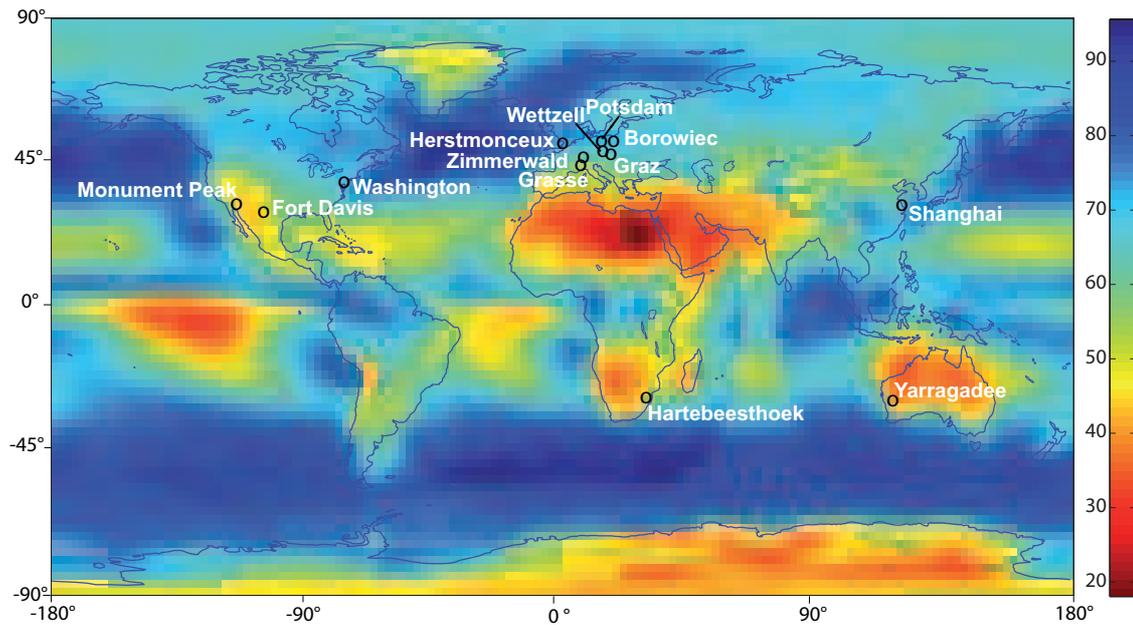


Abbildung 5.15: Mittlere jährliche Wolkenbedeckung, die aus dem ICCP-D2 Projekt zur Verfügung gestellt wird, in Prozent. Die Kreise bezeichnen die geographische Lage der betrachteten SLR-Ko-lokationsstationen.

fälle sind, und je zufälliger diese im Beobachtungszeitraum verteilt sind, desto geringer wird ihr Einfluss auf die berechnete Stationshöhe.

Die in Tabelle 5.13 angegebenen Luftdruckdifferenzen unterscheiden sich teilweise sehr stark. Es soll daher überprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen Luftdruckdifferenz und dem absoluten mittleren Luftdruck auf der Station besteht. In Abbildung 5.16 ist die Luftdruckdifferenz über dem mittleren Luftdruck der Station aufgetragen. Der mittlere Luftdruck hängt im Wesentlichen von der Stationshöhe ab (siehe auch Gleichung 3.12), die in der Abbildung ebenfalls mit angegeben ist. Stationen, die sich in einer Entfernung von mehr als 50 km von der Küste befinden sind blau, Stationen die weniger als 50 km von einer Küste entfernt sind, sind grau dargestellt.

Für die Stationen mit einer Entfernung von mehr als 50 km zur Küste ist ein Zusammenhang zwischen dem mittleren Luftdruck \bar{p} und der Luftdruckdifferenz $\bar{p} - \bar{p}_{\text{SLR}}$ deutlich zu erkennen. Je größer der mittlere Luftdruck ist, desto größer ist auch die Luftdruckdifferenz. Die Station Fort Davis zeigt ein ganz unerwartetes Verhalten: Der über alle SLR-Beobachtungsepochen gemittelte Luftdruck ist geringfügig kleiner als der mittlere Gesamtluftdruck. Fort Davis ist mit einer Höhe von 1594 m eine der höchstgelegenen der hier betrachteten SLR-Stationen. Hinzu kommt, dass sie sich in einer sehr trockenen, niederschlagsarmen Region befindet. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Beobachtungsverteilung nur sehr wenig von den Wetterbedingungen beeinflusst ist und das Ergebnis eher auf andere Einflüsse zurückzuführen ist.

Die küstennahen Stationen zeigen im Vergleich zu den kontinentalen Stationen gleichen mittleren Luftdrucks kleinere Luftdruckdifferenzen. Eine Ausnahme ist die Station Grasse, die eine besondere Lage hat: Sie befindet sich nahe der Mittelmeerküste, aber auf einer Höhe von etwa 1322 m, eingebettet zwischen Bergketten. Möglicherweise ist diese Lage für die große Luftdruckdifferenz verantwortlich. Die Station Yarragadee weist im Vergleich zu allen anderen Stationen gleichen mittleren Luftdrucks eine sehr kleine Luftdruckdifferenz auf. Der Grund ist die sehr hohe Beobachtungsdichte der Station, die aus dem im Vergleich niedrigen Bedeckungsgrad resultiert (vergl. Abbildung 5.15).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Höhenfehler, den eine SLR-Station aufweist, von der Luftdruckdifferenz und dem Regressionsfaktor abhängt. Stationen, die nahe an der Küste liegen, haben einen kleinen Regressionsfaktor. Eine bestimmte Luftdruckdifferenz führt also zu einem kleineren Höhenfehler als bei einer Station im Inland. Die Luftdruckdifferenz ihrerseits ist abhängig von der Lage der Station. Insbesondere Stationen mit einer geringeren Höhe (also einem großen mittleren Luftdruck) weisen eine große Luftdruckdifferenz und damit einen großen Höhenfehler auf. Ein Zusammenhang zwischen mittlerem Luftdruck und Luftdruckdifferenz lässt sich hier insbesondere für die Stationen mit einer Entfernung von mehr als 50 km von der Küste erkennen (Abbildung 5.16). Stationen, die sich in Küstennähe befinden, zeigen im Vergleich kleinere Luftdruck-

Tabelle 5.13: Differenzen zwischen dem mittleren Luftdruck aller Epochen und dem mittleren Luftdruck der Beobachtungsepochen sowie die sich aus diesen Luftdruckdifferenzen ergebenden mittleren Höhenabweichungen der SLR-Stationen. Die Luftdruckdifferenzen sind signifikant bestimmt.

Station	DOMES-Nummer und Kurzbe- zeichnung	Zeitraum	ellipsoid. Höhe [m]	Luftdruck- differenz $\bar{p} - \bar{p}_{SLR}$ [mbar]	Regressions- faktor	Höhen- differenz [mm]
Entfernung zur Küste < 50 km						
Grasse	10002S001 7835	2001.0-2004.5	1322.8	-1.71	-0.337	0.57
Herstmonceux	13212S001 7840	2001.0-2007.0	75.3	-2.30	-0.327	0.75
Shanghai	21605S001 7837	2001.0-2005.4	27.8	-1.43	-0.280	0.39
Washington	40405S105 7105	2001.0-2007.0	19.2	-1.51	-0.360	0.54
Yarragadee	50107M001 7090	2001.0-2006.8	241.4	-0.38	-0.419	0.16
Entfernung zur Küste > 50 km						
Graz	11001S002 7839	2001.0-2007.0	539.4	-2.04	-0.471	0.96
Borowiec	12205S001 7811	2001.0-2006.8	122.6	-3.31	-0.410	1.35
Potsdam	14106S009 7836	2001.0-2004.5	133.5	-3.11	-0.400	1.24
	14106S011 7841	2003.0-2007.0	127.3	-3.30	-0.400	1.32
Wetzell	14201S018 8834	2001.0-2007.0	665.4	-1.89	-0.442	0.84
Zimmerwald	14001S007 7810	2001.0-2007.0	951.3	-4.25	-0.413	1.87
		2001.0-2007.0*	951.3	-1.20	-0.413	0.48
Hartebeesthoek	30302M003 7501	2001.0-2007.0	1406.8	-0.71	-0.566	0.40
Fort Davis	40442M012 7080	2001.0-2007.0	2004.3	0.47	-0.471	-0.22
Monument Peak	40497M001 7110	2001.0-2007.0	1839.0	-0.12	-0.401	0.12

* Die SLR-Station Zimmerwald hat im angegebenen Zeitraum mehrmals an einigen aufeinanderfolgenden Tagen nicht beobachtet. Diese Tage wurden im Gesamtmittel nicht berücksichtigt.

differenzen. Damit kann geschlossen werden, dass Stationen im Landesinneren, die eine geringe Stationshöhe haben und sich nicht in einer regenarmen Region befinden, die größten Höhenfehler aufweisen.

Für diese Untersuchung der SLR-Stationen wurde angenommen, dass Luftdruckvariationen ohne Zeitverzögerung zu einer Deformation der Erdkruste führen. Es wäre jedoch denkbar, dass diese Reaktion mit einer zeitlichen Verzögerung erfolgt. Bislang gibt es jedoch keine der Autorin bekannten Untersuchungen, die sich mit dieser Thematik befassen. Eine zeitlich verzögerte Reaktion der Erdkruste würde aber zu einer Verringerung des Höhenfehlers führen, so dass die hier berechneten Werte die maximalen Höhenfehler für die jeweilige Station angeben. OTSUBO *et al.* (2004) erhalten aus ihren Untersuchungen Höhenabweichungen in derselben Größenordnung, allerdings unterscheiden sie sich die Werte von den hier erhaltenen Ergebnissen für einzelne Stationen teilweise deutlich. Eine Abhängigkeit von der Stationshöhe ist zudem aus den Ergebnissen von OTSUBO *et al.* (2004) nicht eindeutig ableitbar. Das ist einerseits auf die Unterschiede zwischen den Regressionsfaktoren, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden und denen, die von OTSUBO *et al.* (2004) geschätzt wurden, zurückzuführen. Andererseits geben OTSUBO *et al.* (2004) die Höhenabweichung nur etwa für die Hälfte der hier betrachteten Stationen an, was den Nachweis der Höhenabhängigkeit erschwert.

5.2.3.2 Analyse der Datumparameter

Die kombinierte Lösung soll dahingehend überprüft werden, ob das geodätische Datum in allen Netzteilen (GPS, VLBI und SLR) konsistent realisiert ist. Die einzelnen Netzteile werden dafür mittels einer 7-Parameter-Ähnlichkeitstransformation auf den Referenzkoordinatensatz transformiert. Die Tabelle 5.14 gibt die geschätzten Transformationsparameter an.

Für SLR wird die größte Differenz zur Referenzlösung für die X-Komponente des Koordinatenursprungs geschätzt. Ein Vergleich mit den entsprechenden Komponenten der GPS- und VLBI-Lösung zeigt, dass diese in der X-Komponente vergleichbare Differenzen zur Referenzlösung zeigen. Die Unterschiede zwischen den Beobachtungsverfahren sind nicht signifikant. In der Y-Komponente weisen der SLR- und der GPS-Netzteil nur minimale Unterschiede zur Referenzlösung, VLBI dagegen eine deutlich größere Abweichung auf. Die Differenzen zwischen den für die drei Verfahren geschätzten Werten sind jedoch ebenfalls nicht signifikant. In der

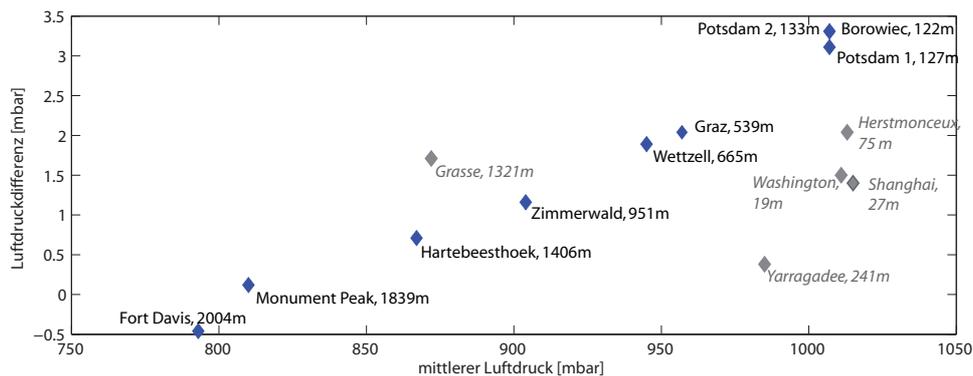


Abbildung 5.16: Luftdruckdifferenz $\bar{p} - \bar{p}_{SLR}$ in Abhängigkeit vom mittleren Luftdruck der Stationen. Stationen, die sich in einer Entfernung von mehr als 50 km zur Küste befinden, sind blau dargestellt. Stationen, die sich in einer Entfernung von weniger als 50 km zur Küste befinden, sind grau dargestellt.

Tabelle 5.14: Transformationsparameter zwischen den Netzteilen der kombinierten Lösung und einem Referenzkoordinatensatz. Alle Transformationsparameter sind in [mm] beziehungsweise [mm/a] auf der Erdoberfläche angegeben.

Beobachtungsverfahren/ Netzteil	Referenzlösung	Transformationsparameter						
		$\Delta X, \dot{\Delta X}$	$\Delta Y, \dot{\Delta Y}$	$\Delta Z, \dot{\Delta Z}$	$\alpha, \dot{\alpha}$	$\beta, \dot{\beta}$	$\gamma, \dot{\gamma}$	$\mu, \dot{\mu}$
GPS	IGS05	3.1 ± 0.4	-0.9 ± 0.4	3.5 ± 0.4	0.0 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	0.7 ± 0.5	-2.0 ± 0.4
		0.0 ± 0.1	0.5 ± 0.1	-1.2 ± 0.2	0.2 ± 0.2	-0.1 ± 0.2	-0.2 ± 0.1	-0.1 ± 0.2
VLBI	ITRF2005	3.6 ± 1.3	-2.8 ± 1.3	4.2 ± 1.3	-0.4 ± 1.7	-0.1 ± 0.2	0.2 ± 0.1	-0.1 ± 0.2
		0.4 ± 0.3	0.1 ± 0.3	-1.4 ± 0.3	-0.3 ± 0.4	-0.8 ± 0.4	-0.2 ± 0.2	0.0 ± 0.4
SLR	ITRF2005 (reskaliert)	2.5 ± 1.6	-0.3 ± 1.4	-0.1 ± 1.6	1.3 ± 1.9	0.4 ± 2.6	-4.9 ± 1.9	1.9 ± 1.4
		-0.1 ± 0.4	0.1 ± 0.4	-1.3 ± 0.6	-0.4 ± 0.6	0.1 ± 0.6	0.1 ± 0.4	0.8 ± 0.4

Z-Komponente weist auch SLR nur eine minimale Differenz zur Referenzlösung auf, während der Unterschied für GPS signifikant ist. Die Z-Translation für VLBI hat dieselbe Größenordnung wie für GPS, ist jedoch nicht signifikant bestimmt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle Netzteile bezüglich des Koordinatenursprungs konsistent sind. Die Unterschiede zwischen den ersten zeitlichen Ableitungen der Translationsparameter sind ebenfalls nicht signifikant.

Die Rotationsparameter sind nicht signifikant, und es liegt Konsistenz zwischen allen Netzteilen bezüglich der Orientierung und der Orientierungsänderung vor.

Zu Beginn des Kapitels 5.2.2 wird gezeigt, dass die GPS- und SLR-Lösung jeweils einen großen Unterschied im Netzmaßstab gegenüber der Referenzlösung aufweisen, der im Fall von GPS auch signifikant bestimmt ist. Dabei haben die für GPS und SLR angegebenen Werte unterschiedliche Vorzeichen. Die für die Netzteile der kombinierten Lösung geschätzten Skalierungsfaktoren zeigen die gleiche Charakteristik, jedoch verringert sich der Unterschied zwischen den für GPS und SLR geschätzten Werten im Vergleich zu Tabelle 5.7 um 1.2 mm. Das lässt vermuten, dass die GPS- und die SLR-Lösung tatsächlich einen Unterschied im Netzmaßstab aufweisen, der durch die Kombination verringert wird. Die verbleibende Differenz ist aber, wegen der Ungenauigkeit der für das SLR-Netz geschätzten Transformationsparameter, nicht signifikant bestimmt.

5.2.3.3 Analyse der Erdrotationsparameter

Ein Vergleich der Erdrotationsparameter der kombinierten Lösung mit den Ergebnissen, die aus den Analysen der einzelnen Verfahren erhalten wurden, zeigt, inwieweit durch die Kombination eine Stabilisierung der Erdrotationsparameter erreicht werden kann. In der Abbildung 5.17 sind die Zeitreihen der Erdrotationsparameter der einzelnen Lösungen dargestellt. Die Streuungen der Zeitreihen sind in Tabelle 5.15 angegeben. Um den Effekt der Kombination auf die Parameter besser zu veranschaulichen, werden alle Parameter um die Werte einer Referenzzeitreihe reduziert. Als Referenz wird IERS EOP 05 C04 gewählt. Diese Reihe ist ein Satz von

Erdrotationsparametern, der ebenfalls durch Kombination von GPS- und VLBI-Beobachtungen berechnet wurde. Durch Transformation wurde er an den in dieser Arbeit gewählten Referenzrahmen ITRF2005 angepasst und ist mit diesem konsistent (http://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopEOP_05_C04/EOP_05_C04.guide.pdf, 19.07.2007). Die IERS EOP 05 C04 Reihe liegt mit täglicher Auflösung vor. Es handelt sich um eine gefilterte Reihe, die für die terrestrischen Polkoordinaten und UT1-UTC keine Perioden unter zwei Tagen und für die Nutationswinkel keine Perioden unter 11.2 Tagen enthält. Im kurzperiodischen Bereich sind daher Abweichungen der hier berechneten EOP-Reihen von IERS EOP 05 C04 zu erwarten.

Die Darstellung der Nutationswinkel erfolgt zunächst gegenüber dem Modell IAU2000A (siehe Kapitel 5.1.1), welches jedoch die FCN (*free core nutation*) nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 2.3). Die durch die FCN hervorgerufenen Perioden von 432 Tagen sind in den Zeitreihen der Nutationswinkel in Abbildung 5.17 (d) und (e) gut zu erkennen. Existierende Modelle zur Beschreibung der FCN von MATHEWS *et al.* (2002) und Lambert (MCCARTHY und PETIT 2004), die auf geodätischen Beobachtungen basieren, sind leider für den verwendeten Zeitraum nicht mehr gültig und können nicht für eine Validierung verwendet werden. Es wurde versucht, die Zeitreihen zur Berechnung der Streuung der Nutationsreihen um die Werte der IERS EOP 05 C04 - Reihen zu reduzieren. Dabei wurde jedoch festgestellt, dass für den Nutationswinkel $\Delta\psi$ die FCN durch die Differenzbildung nicht vollständig reduziert werden konnte. Aus diesem Grunde werden zur Berechnung der Streuung Amplitude und Phase einer Sinusfunktion mit einer Periode von 432 Tagen je Zeitreihe geschätzt und die Zeitreihen um diese Funktion reduziert. Die Schätzung der Sinusfunktion muss für beide Jahre getrennt erfolgen, da die Amplitude der FCN aufgrund ihrer Abhängigkeit von variierenden geophysikalischen Anregungen nicht konstant ist. Da die Schätzung nur aus je einem Jahr erfolgen kann, sollen die geschätzten Amplituden und Phasen nicht angegeben und interpretiert werden. Das geschätzte Signal ist aber ausreichend genau, um Nutationszeitreihen mit einem näherungsweise linearen Verhalten zu erhalten.

Tabelle 5.15: Streuung der Erdrotationsparameter. Die Streuung der Polkoordinaten und UT1-UTC ist gegenüber IERS EOP 05 C04 angegeben, wobei die Zeitreihen zusätzlich um eine mittlere Differenz und eine zeitlich lineare Änderung gegenüber IERS EOP 05 C04 reduziert wurden. Die Streuung der Nutationsparameter ist in Bezug zum Nutationsmodell IAU2000 und einer geschätzten Sinusfunktion mit einer Periode von 432 Tagen angegeben. Für die Zeitreihen aus der kombinierten Lösung werden zwei Streuungswerte angegeben: (a) unter Berücksichtigung aller Parameter und (b) unter Berücksichtigung nur der Parameter, die zu gemeinsamen Epochen geschätzt wurden. Für die GPS- und die SLR-Lösung ist die Streuung bei Berücksichtigung aller Parameter oder nur der Parameter zu gemeinsamen Epochen jeweils fast identisch. Deshalb wird nur die Streuung angegeben, die aus der gesamten GPS- beziehungsweise SLR-Zeitreihe erhalten wird.

	X-Pol [mas]	Y-Pol [mas]	UT1-UTC [ms]	$\Delta\psi \cdot \sin(\epsilon_0)$ [mas]	$\Delta\epsilon$ [mas]
WRMS					
GPS	0.0966	0.0939	-	-	-
VLBI	0.1453	0.1300	0.0091	0.1032	0.0989
SLR	0.2391	0.2677	-	-	-
(a) kombiniert	0.0942	0.0893	0.0162	0.1168	0.0940
(b) kombiniert (nur gemeinsame Epochen)	0.0906	0.0842	0.0120	0.1113	0.1072
RMS					
GPS	0.1025	0.1003	-	-	-
VLBI	0.2451	0.2343	0.0186	0.1521	0.1460
SLR	0.2595	0.2866	-	-	-
(a) kombiniert	0.1048	0.0991	0.0242	0.1633	0.1705
(b) kombiniert (nur gemeinsame Epochen)	0.0928	0.0885	0.0161	0.1304	0.1293

Die WRMS-Werte in Tabelle 5.15 zeigen, dass für die Polkoordinaten durch die Kombination eine Verringerung der Streuung gegenüber IERS EOP 05 C04 erreicht werden kann. Werden nur gemeinsame Epochen betrachtet, ist die Abnahme noch größer. Für UT1-UTC nimmt der WRMS-Wert in der Kombination zu, auch wenn nur gemeinsame Epochen berücksichtigt werden. Ein Blick auf die RMS-Werte im unteren Teil der Tabelle zeigt, dass für die gemeinsamen Epochen die Streuung selbst abnimmt. Die Standardabweichungen der UT1-UTC-Werte reflektieren jedoch nicht die Abweichung der Parameter von der IERS EOP 05 C04-Reihe. Eine Ursache dafür könnte sein, dass die aus GPS erhaltenen Standardabweichungen im Vergleich zu den aus VLBI berechneten zu klein sind, da die Korrelationen zwischen den GPS-Beobachtungen nicht bekannt sind und nicht berücksichtigt

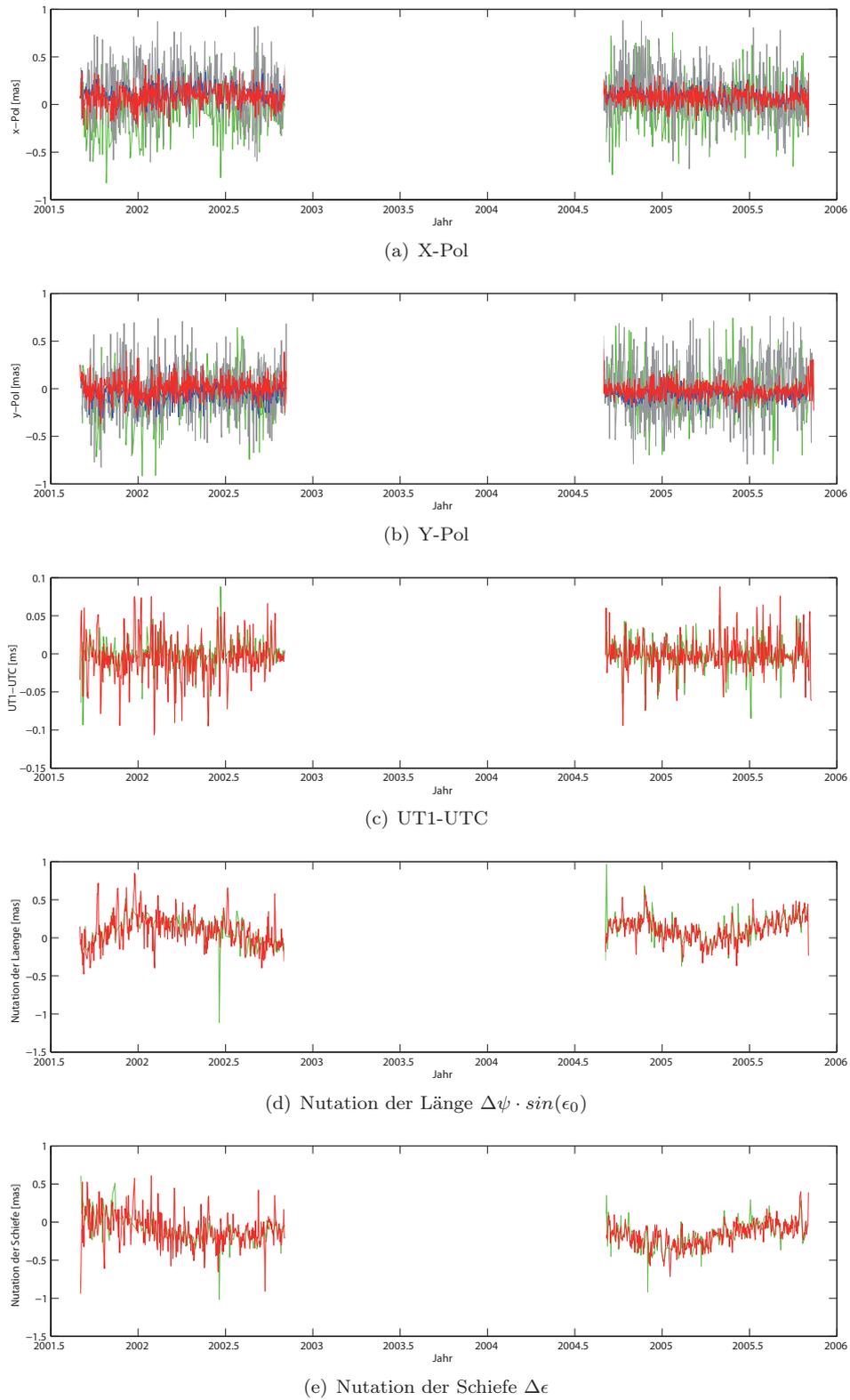


Abbildung 5.17: Erdrotationsparameter abgeleitet aus VLBI (grün), SLR (grau), GPS (blau) und aus einer kombinierten Lösung (rot). Die Polkoordinaten und UT1-UTC sind relativ zu IERS EOP 05 C04 dargestellt. Die Nutationswinkel beziehen sich auf IAU2000.

werden können. Aus GPS kann nur die erste zeitliche Ableitung von UT1-UTC bestimmt werden. Da VLBI nur zu etwa 75% der geschätzten UT1-UTC-Werte beiträgt, nimmt der RMS-Wert, der aus allen Parametern berechnet wird, gegenüber dem der VLBI-Lösung zu.

Die Streuung der Nutationsparameter gegenüber dem Modell IAU2000A und einer zusätzlich geschätzten FCN wird durch die Kombination verringert, wenn nur gemeinsame Epochen berücksichtigt werden. Dies wird bei Betrachtung der RMS-Werte deutlich. Bei Berücksichtigung aller Parameter wird eine Streuung erhalten, die größer ist, als die der VLBI-Zeitreihe. Wie im Fall von UT1-UTC können aus GPS nur die zeitlichen Ableitungen der Nutationswinkel bestimmt werden. Daher werden bei Berücksichtigung aller Epochen auch für die kombinierten Zeitreihen der Nutationswinkel Streuungen erhalten, die größer sind als die der entsprechenden VLBI-Zeitreihen.

Zu den in Tabelle 5.15 angegebenen Streuungen muss angemerkt werden, dass die für die Kombination gewählte Parametrisierung nicht der für selbständige VLBI-Lösungen optimalen Parametrisierung entspricht (Kapitel 5.1.1). Die Streuungen für die aus VLBI abgeleiteten Parameter sind daher etwas größer, als sie aus einer VLBI-Lösung eigentlich zu erwarten wären.

Neben dem Vergleich mit den EOP der IERS EOP 05 C04-Reihe könnte auch an eine Validierung mittels geophysikalischer Anregungsfunktionen gedacht werden. Basierend auf Literatur von u.a. MUNK und McDONALD (1960), BRZEZINSKI (1992) und GROSS und LINDQWISTER (1992) stellen GROSS *et al.* (2003), GROSS *et al.* (2004), SEITZ (2004) und BOURDA (2008) Ansätze vor, wie die Polbewegung und LOD aus geophysikalischer Anregung berechnet werden können. Gleichzeitig wird aber gezeigt, dass die heutigen Atmosphären- und Ozeanmodelle zu ungenau sind, um die Polkoordinaten und LOD mit der Genauigkeit zu erhalten, wie es aus den geodätischen Raubeobachtungsverfahren möglich ist. Von einem Vergleich mit geophysikalischer Anregung soll daher in dieser Arbeit abgesehen werden.

Die FCN wird durch Wechselwirkungen zwischen Erdkern und -mantel angeregt und durch atmosphärische und ozeanische Anregung verstärkt (siehe Kapitel 2.3). Deshalb wäre eine Validierung der FCN mittels geophysikalischer Anregungsfunktionen denkbar. BRZEZINSKI und BOLOTIN (2006) zeigen einen Vergleich der aus den Raubeobachtungsverfahren abgeleiteten FCN mit entsprechenden Berechnungen aus atmosphärischen und ozeanischen Anregungen. Die geringe Korrelation zwischen den Reihen zeigt, dass die aus den derzeit verfügbaren Atmosphären- und Ozeanmodellen berechneten Anregungen nicht für eine Validierung der FCN geeignet sind.

Die Transformation vom raumfesten Referenzrahmen in den terrestrischen Referenzrahmen erfolgt, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, mittels fünf statt der notwendigen drei Rotationswinkel (Rotationsparameter). Daraus resultiert eine rein mathematische Korrelation zwischen den Parametern. Die Abhängigkeit von Polkoordinaten und Nutationswinkeln ergibt sich aus der in Kapitel 2.3 angegebenen Transformationsgleichung (Gleichung 2.1) für den Übergang vom terrestrischen auf den zälestischen Referenzrahmen. Die Matrix \mathbf{M} sei die Transformationsmatrix, die die Rotationen um die Nutationswinkel, den Greenwicher Stundenwinkel und die Polkoordinaten umfasst:

$$\mathbf{M} = \mathbf{N}(t)\mathbf{R}_3(-\Theta)\mathbf{R}_1(y)\mathbf{R}_2(x). \quad (5.2)$$

Die Matrix \mathbf{M} kann ausführlich geschrieben werden in der Form:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & \sin\Theta & \psi\cos\Theta\sin\epsilon_0 + \epsilon\sin\Theta + x \\ -\sin\Theta & \cos\Theta & -\psi\sin\Theta\cos\epsilon_0 + \epsilon\cos\Theta + y \\ -\psi\sin\epsilon_0 + x\cos\Theta + y\sin\Theta & -\epsilon - x\sin\Theta - y\cos\Theta & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Wird gefordert, dass die Matrix \mathbf{M} zu einem bestimmten Zeitpunkt konstant sein soll, dann führt eine Änderung der Polkoordinaten auch zu einer Änderung der Nutationswinkel. Aus den Elementen (1,3) und (2,3) der Matrix \mathbf{M} ergeben sich die folgenden Beziehungen zwischen den geschätzten Parametern:

$$\delta x = -\delta\psi\sin\epsilon_0\cos\Theta - \delta\epsilon\sin\Theta \quad (5.4)$$

$$\delta y = \delta\psi\sin\epsilon_0\sin\Theta - \delta\epsilon\cos\Theta. \quad (5.5)$$

Die Gleichungen 5.4 und 5.5 zeigen, dass eine zeitlich konstante Änderung der Nutationswinkel durch ein retrogrades Sinus-Cosinus-Signal in der Polbewegung mit einer Periode von einem Sterntag repräsentiert wird (THALLER *et al.* 2007). Werden Polkoordinaten und Nutationswinkel aus den Beobachtungen über die Dauer exakt eines Sterntages (Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden oberen Kulminationen des Frühlingspunkts) geschätzt, und sind diese Beobachtungen innerhalb des Sterntages gleich verteilt, dann sind Polkoordinaten und

Nutationswinkel nicht korreliert. Wird gleichzeitig eine tägliche zeitlich-lineare Änderung der Polkoordinaten geschätzt, so weist diese eine Korrelation mit den Nutationswinkeln auf. Zusätzlich geschätzte zeitlich lineare Änderungen der Nutationswinkel führen zu einer zeitlich linear zunehmenden Amplitude des sich im terrestrischen Pol abbildenden Sinus-Cosinus-Signals (THALLER *et al.* 2007). Die zeitlich linearen Änderungen der Nutationswinkel weisen deshalb Korrelationen mit den Polkoordinaten und deren zeitlichen Ableitungen auf. In Abbildung 5.18 sind die geschätzten Parameter und deren zeitliche Änderung graphisch veranschaulicht. Die Existenz der beschriebenen Korrelationen zwischen den Parametern wird anhand der Abbildung offensichtlich.

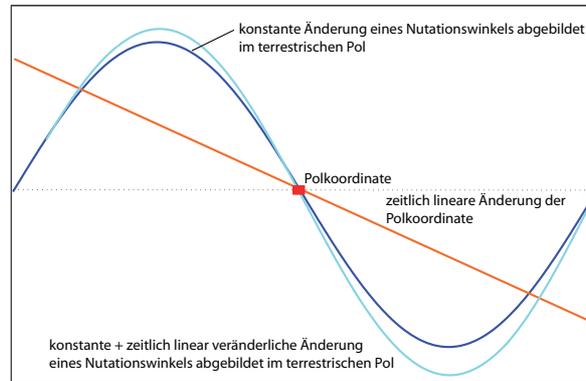


Abbildung 5.18: Terrestrischer Pol und Abbildung der geschätzten Nutationsparameter in den terrestrischen Pol während eines Sterntages, dargestellt am Beispiel einer Polkoordinate und eines Nutationswinkels.

In dieser Arbeit werden Polkoordinaten, Nutationswinkel und durch die stückweise stetige Darstellung indirekt auch deren zeitliche Ableitungen gemeinsam geschätzt, und es treten die beschriebenen Korrelationen zwischen Nutations- und Polparametern auf.

Würden die Beobachtungen eines Sterntages zur Schätzung der EOP verwendet, so wären die Korrelationen der Parameter für alle Tage konstant. Als ein Beobachtungsintervall (eine Session) wird jedoch normalerweise ein Sonnentag gewählt. Durch einen Unterschied zwischen der Länge eines Sonnen- und eines Sterntages von rund $1/365$ Tagen (etwa 4 Minuten) kommt es von Tag zu Tag zu einer Phasenverschiebung des im terrestrischen Pol abgebildeten Nutationssignals. Aus diesem Zyklus resultiert eine jährliche Variation der Korrelationen zwischen den Parametern. Bisher wurden diese Korrelationen nur für die Schätzung von EOP mit subtäglicher Auflösung untersucht (zum Beispiel in THALLER *et al.* (2007)), jedoch treten Korrelationen zwischen Nutationsparametern und Polkoordinaten immer auf, wenn das für die Schätzung gewählte Zeitintervall vom ganzzahligen Vielfachen eines Sterntages abweicht. Je länger das gewählte Intervall ist, desto kleiner sind zwar die Korrelationen, aber die lineare Darstellung kann das zeitliche Verhalten der geschätzten Parameter nur über einen kurzen Zeitraum repräsentieren. Daher muss das Zeitintervall kurz gewählt werden. Die Zeitspanne von einem Tag, wie sie auch in dieser Arbeit gewählt wurde, ist allgemein üblich.

Anhand der Rotationsmatrix \mathbf{M} in Gleichung 5.3 können die mathematischen Korrelationen zwischen den EOP hergeleitet werden. In dieser Arbeit wurde eine stückweise stetige Darstellung der EOP gewählt. Für die zu Beginn eines Beobachtungstages (0 Uhr) und am Ende eines Beobachtungstages (24 Uhr) geschätzten Nutations- und Polparameter ergibt sich jeweils eine jährliche Variation der Korrelationen mit einer Amplitude von 0.87. Die Phasenverschiebung zwischen den Korrelationen zu Beginn und Ende eines Beobachtungstages beträgt 90° . Die theoretische Korrelation zwischen der Änderung der Nutationswinkel und der Polkoordinaten ist in Abbildung 5.19 für ein tropisches Jahr dargestellt. Das tropische Jahr basiert auf dem Sterntag. Es beginnt und endet am 21. März, wenn die Sonne auf ihrer scheinbaren Bewegung um die Erde das Frühlingsäquinoktium passiert.

Die Abbildung 5.19 zeigt, dass maximale Korrelationen zwischen den Nutations- und den Polparametern geschätzt am Tagesanfang und -ende symmetrisch zu den charakteristischen Tagen des tropischen Jahres auftreten (20./21. März, 21. Juni, 22./23. September, 21./22. Dezember), wenn die Phasenverschiebung zwischen Sonnen- und Sterntag genau 0° , 90° , 180° beziehungsweise 270° beträgt.

Werden die EOP aufeinanderfolgender Tage kombiniert, wird also auf eine kontinuierlich stückweise stetige Darstellung übergegangen, so wird die Amplitude der Korrelationen kleiner. Die Größe hängt ab von der Anzahl der Tage, für die eine kontinuierlich stückweise stetige Darstellung gewählt wird. Die Korrelation kann minimal einen Wert von etwa 0.1 erreichen. Für eine kontinuierlich stückweise stetige Darstellung über 14 Tage wird für den siebten Tag (Mitte des Intervalls) eine maximale Korrelation von etwa 0.27 erhalten.

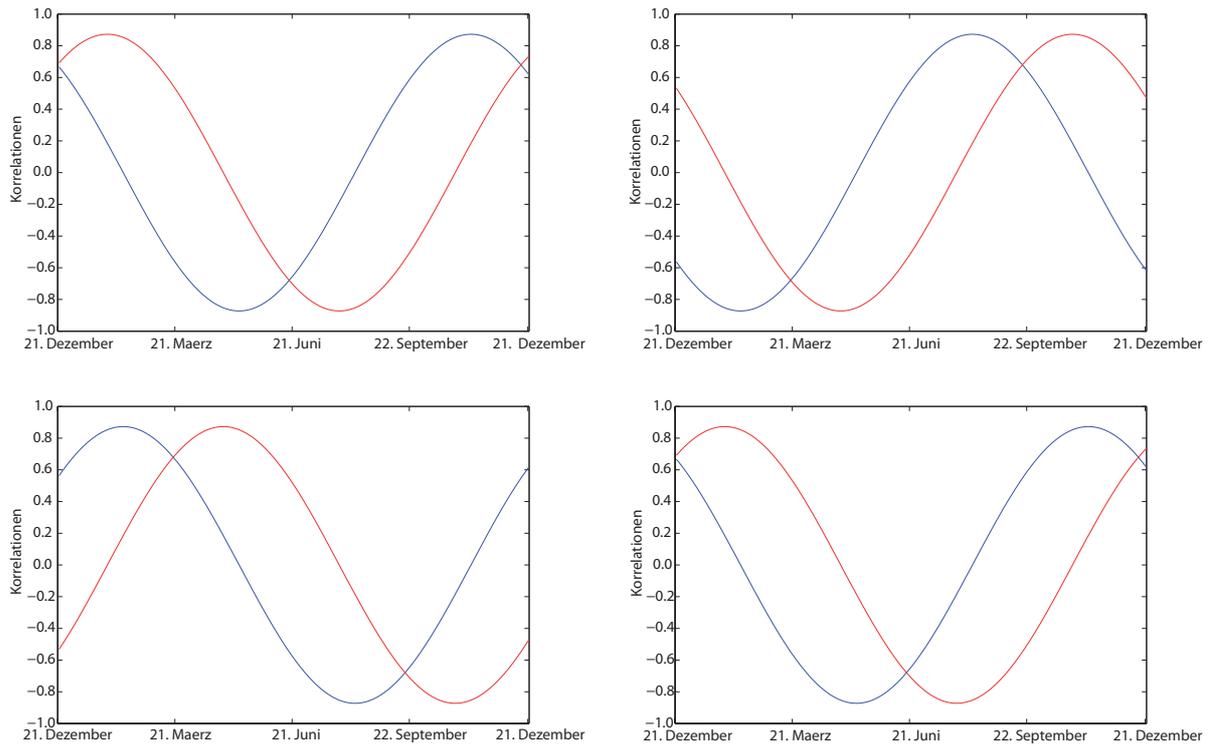


Abbildung 5.19: Zeitliche Variation der Korrelationen zwischen dem geschätzten Nutationswinkel $\Delta\psi$ (oben) beziehungsweise $\Delta\epsilon$ (unten) und der x-Komponente (links) beziehungsweise y-Komponente des terrestrischen Pols (rechts) zu Beginn (blau) und Ende eines Tages (rot) im Verlauf eines tropischen Jahres.

In Abbildung 5.20 sind die Korrelationen zwischen dem Nutationsparameter $\Delta\psi$ und der x-Komponente des terrestrischen Pols dargestellt, die aus den VLBI-Sessions eines Jahres berechnet werden. Die Korrelation zwischen der y-Komponente des terrestrischen Pols und $\Delta\psi$ hat denselben Verlauf und ist gegenüber der dargestellten Zeitreihe um $+90^\circ$ phasenverschoben.

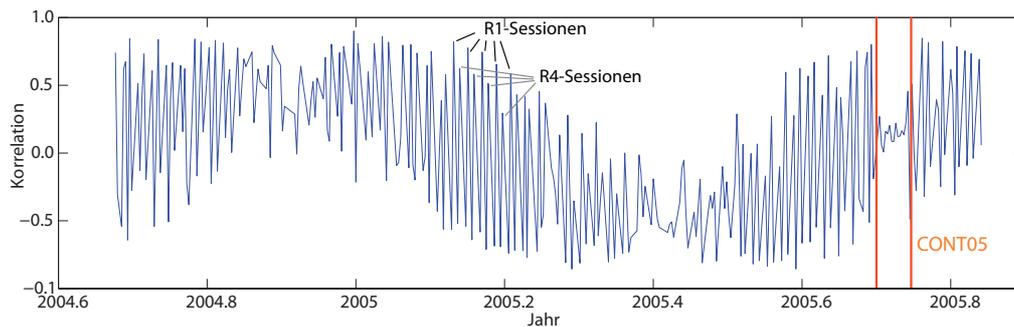


Abbildung 5.20: Korrelationen zwischen der Änderung des Nutationswinkels $\Delta\psi$ und der x-Komponente des Pols, berechnet aus täglichen VLBI-Lösungen über ein Jahr.

In Abbildung 5.20 sind mehrere Effekte sehr gut zu erkennen:

- Die Korrelation zwischen dem Nutationsparameter (hier $\Delta\psi$) und der Polkoordinate (hier x-Komponente) variiert mit einer Periode von einem Jahr. Sie erreicht einen Wert von maximal etwa 0.85 und stimmt damit mit dem theoretischen Wert von 0.87 sehr gut überein.
- Die Korrelationen der Parameter zu Beginn eines Tages und die der Parameter am Ende eines Tages sind um 90° phasenverschoben. Dadurch kommt es zu charakteristischen Sprüngen in den Korrelationszeitreihen.

- Während des CONT05-Zeitraums liegen für 15 aufeinanderfolgende Tage VLBI-Beobachtungen vor. Die für diesen Zeitraum geschätzten EOP sind durch die Kombination der EOP an den Tagesgrenzen in kontinuierlich stückweise stetige Darstellung parametrisiert. Dadurch wird ein starker Rückgang der Korrelation von 0.8 auf etwa 0.2 erreicht.
- Die Geometrie des Stationsnetzes wirkt sich zusätzlich auf die Korrelation der EOP aus. Die R1- und R4-Sessions unterscheiden sich standardmäßig durch ihre Netzkonfiguration, aber auch die Netzkonfiguration innerhalb der R1- beziehungsweise R4-Sessions variiert. Während der Zeit von Mitte Februar bis Mitte März des Jahres 2005 (2005.2) war die Netzkonfiguration der R1- und R4-Sessions jedoch jeweils fast konstant (<http://ivsc.gsfc.nasa.gov/program/descrip2007.html>, 17.04.2008). Die entsprechenden Sessions sind in der Abbildung markiert. Der Effekt des Unterschiedes in der Netzgeometrie zwischen den R1- und R4-Sessions auf die Korrelationen ist für diesen Zeitraum gut zu erkennen.

Die in Abbildung 5.20 gezeigten Korrelationen legen nahe, dass sich eine gleichzeitige Schätzung von Polkoordinaten und Nutationsparametern sowie deren zeitlicher Ableitungen nicht empfiehlt, wenn nicht eine kontinuierlich stückweise stetige Darstellung gewählt werden kann. Da im Falle von VLBI eine solche Darstellung meist nicht möglich ist, muss auf die Schätzung einer zeitlichen Ableitung verzichtet werden. Das verwendete Nutationsmodell IAU2000A (siehe Kapitel 5.1), bezüglich dem Nutationsparameter geschätzt werden, erfasst kurzperiodische Nutationsschwankungen sehr gut. Deshalb wäre ein Verzicht auf die Schätzung der zeitlichen Ableitungen der Nutationsparameter denkbar. Die Korrelationen verringern sich dann auf einen Wert von maximal 0.51. Eine weitere Möglichkeit ist, retrograd-tägliche Polterme in den geschätzten Polkoordinaten durch die Einführung einer Bedingung zu verhindern. Dadurch wird die Korrelation zwischen Nutation- und Polparametern näherungsweise Null. Diese Möglichkeit ist beispielsweise in der Bernese GPS Software implementiert. THALLER *et al.* (2007) weisen jedoch auf das Problem hin, dass neben dem retrograd-täglichen Term weitere retrograde Terme durch die Bedingung erfasst und vollständig oder teilweise unterdrückt werden, da die Signale aufgrund des beschränkten Zeitintervalls nicht voneinander getrennt werden können. Für das gewählte Zeitintervall von einem Tag werden alle retrograden Terme, deren Periode um bis zu maximal 11.95 Stunden von einem Tag abweicht, durch die Bedingung erfasst. Aus diesem Grund wurde auf die Anwendung dieser Bedingung in dieser Arbeit verzichtet.

In Tabelle 5.16 sind die geschätzten maximalen mathematischen Korrelationen zwischen den Parametern für verschiedene Parametrisierungen noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 5.16: Mathematische Korrelationen zwischen gemeinsam geschätzten Nutationsparametern und Polkoordinaten.

Parametrisierung	zeitl. Ableitung der Nutationsparameter geschätzt?	max. Korrelation
ssD ¹	ja	0.87
ssD ¹	nein	0.51
kssD ²	ja	ab 14 Tagen: < 0.3
kssD ²	nein	ab 14 Tagen: ≈ 0
¹ stückweise stetige Darstellung ² kontinuierlich stückweise stetige Darstellung		

Für die Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens wurden die Zeitableitungen der Nutationswinkel parametrisiert. Aufgrund der kontinuierlich stückweise stetigen Darstellung erreichen die Korrelationen einen Maximalwert von <0.3. Die indirekte Schätzung der zeitlichen Ableitungen ist daher möglich und sinnvoll. Um den Effekt der Kombination auf die Parameter zu veranschaulichen, wurde in Tabelle 5.15 auch für VLBI die Streuung angegeben, die aus der Lösung resultiert, in der die Zeitableitungen der Nutationswinkel parametrisiert sind. Die angegebenen Werte entsprechen damit also nicht den Streuungen, die erhalten werden, wenn die VLBI-Beobachtungsgleichungen optimal im Sinne der Erzeugung einer eigenständigen VLBI-Lösung parametrisiert sind.

5.3 Realisierung eines zeitunabhängigen Referenzrahmens (Epochen-Referenzrahmen)

Wie bei der Realisierung des zeitabhängigen Referenzrahmens sind für die Berechnung eines Epochenreferenzrahmens einige vorbereitende Schritte nötig, bevor die Kombination selbst durchgeführt werden kann. Dies sind die in Kapitel 5.2.1.1 beschriebene Rekonstruktion der freien Normalgleichung aus den SINEX-Dateien und die in Kapitel 5.2.1.2 erläuterten Schritte: Anpassung der Näherungswerte an einen einheitlichen Referenzkoordinatensatz, Einführung von Unstetigkeiten und Reduktion der Ausreißer. Für die Berechnung des zeitunabhängigen Referenzrahmens werden die für die Kombination des zeitabhängigen Referenzrahmens vorverarbeiteten Normalgleichungen verwendet.

Da die SLR-Normalgleichungen nur mit einer zeitlichen Auflösung von einer Woche vorliegen, werden die Untersuchungen zur täglichen Kombination anhand täglicher GPS- und VLBI-Normalgleichungen durchgeführt.

Für die betrachteten Zeiträume standen insgesamt 326 VLBI-Session-Normalgleichungen zur Verfügung. Für jede der VLBI-Normalgleichungen wurden die EOP in eine *stückweise stetige Darstellung* überführt, bei der je ein EOP-Wert zu 0 Uhr und 24 Uhr eines Tages geschätzt wird (siehe Kapitel 5.1.1). Die GPS-Normalgleichungen lagen bereits mit dieser Parametrisierung vor. Für jede der VLBI-Sessions kann damit eine GPS-Tagesnormalgleichung gefunden werden, die EOP zu exakt denselben Epochen enthält. Auch wenn die VLBI-Normalgleichungen in aller Regel Beobachtungen aus einem der angrenzenden Tage enthalten, wird für die Kombination nur die GPS-Normalgleichung des Tages verwendet, der mit der VLBI-Session die größte Schnittmenge hat, um die bereits existierende Überzahl der GPS-Beobachtungen nicht zu vergrößern.

In Kapitel 5.2.3.3 wurde die Entstehung mathematischer Korrelationen zwischen Nutations- und Polparametern erläutert. Es wurde geschlussfolgert, dass für die Schätzung der EOP aus den Beobachtungen eines Tages die zeitliche Ableitung der Nutationswinkel nicht parametrisiert werden sollte, um die Separierbarkeit der zu schätzenden Parameter zu gewährleisten. Die Änderung der Nutationswinkel wird daher bei der Berechnung der täglichen Referenzrahmen nicht geschätzt.

5.3.1 Vergleich und Kombination der Raubeobachtungsverfahren

Das in dieser Arbeit verwendete Kombinationsmodell für die Realisierung eines zeitunabhängigen Referenzrahmens wurde in Kapitel 4.3.2 vorgestellt. Es umfasst die Komponenten:

- Bestimmung der Varianzkomponenten
- Auswahl der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren
- Festlegung des geodätischen Datums.

In den anschließenden Abschnitten wird die Umsetzung der einzelnen Schritte erläutert.

5.3.1.1 Bestimmung der Varianzkomponenten

Die Varianzkomponenten werden wie in Kapitel 4.3.2.2 beschrieben berechnet. Dabei wird gefordert, dass die aus der Kombinationslösung erhaltenen Standardabweichungen für eine mittlere Stationsposition in derselben Relation zueinander stehen sollen wie die täglichen Wiederholbarkeiten der mittleren Stationsposition (Gleichung 4.91). Die Tabelle 5.17 gibt eine Übersicht über die Standardabweichungen, die RMS-Werte und die für VLBI berechnete Varianzkomponente, wenn die Varianzkomponente von GPS auf 1.0 festgesetzt wird.

5.3.1.2 Auswahl der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren

Für die Berechnung eines zeitunabhängigen Referenzrahmens stellt sich die Situation bezüglich der zur Verfügung stehenden Ko-lokationsstationen anders dar als für den zeitabhängigen Referenzrahmen, da im Verlauf einer einzelnen VLBI-Session nur ein Teil der in Tabelle 5.4 angegebenen Ko-lokationsstationen beobachtet. Die insgesamt 326 VLBI-Sessions, die für die Analysen zur Verfügung stehen, unterscheiden sich zudem stark hinsichtlich ihrer Netzgeometrie und der Anzahl der Stationen, weswegen auch die Anzahl der Ko-lokationsstationen von Session zu Session sehr stark variiert. Die Abbildung 5.21 gibt einen Überblick über die Anzahl der je Session zur

Tabelle 5.17: Bestimmung der Varianzkomponenten für die tägliche Kombination.

	$\bar{\sigma}_{\text{COV}}$ [mm]	$\bar{\sigma}_{\text{ZR}} = \overline{\text{RMS}}$ [mm]	Varianz- komponente
GPS	0.8	1.2	1.0^2
VLBI	2.0	1.4	$1/2.1^2$

Verfügung stehenden terrestrischen Differenzvektoren. Sie zeigt, dass im Durchschnitt an den VLBI-Sessions nur fünf bis sechs Ko-lokationsstationen beteiligt sind. Ausnahmen stellen die beiden CONT-Kampagnen des IVS dar, während derer jeweils ein VLBI-Stationsnetz kontinuierlich beobachtete. Die Netze der CONT-Kampagnen wurden so gewählt, dass jede der Stationen über eine Ko-lokation zu GPS verfügte. An der CONT02-Kampagne waren acht, an der CONT05-Kampagne elf Ko-lokationsstationen über fast den gesamten Kampagnenzeitraum beteiligt. Eine genauere Beschreibung der CONT-Kampagnen einschließlich der Abbildungen der Stationsnetze findet sich in Kapitel 5.1.

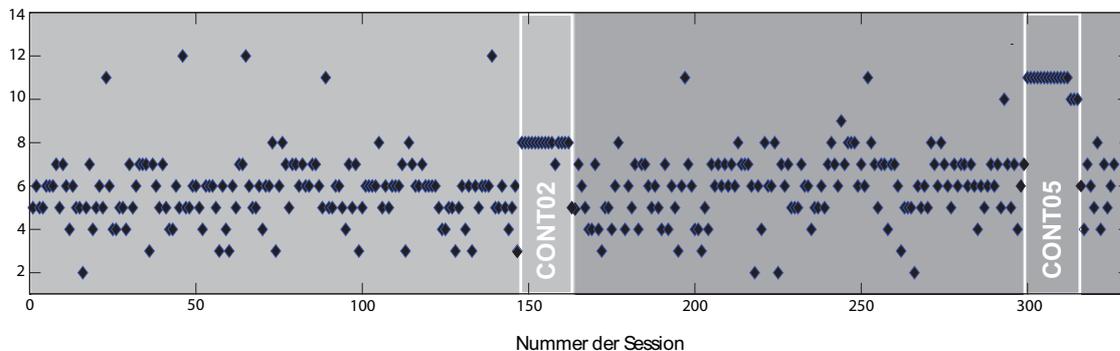


Abbildung 5.21: Anzahl der verfügbaren terrestrischen Differenzvektoren je Session. Die Sessionen von September 2001 bis Oktober 2002 sind hell-, diejenigen von September 2004 bis Oktober 2005 dunkelgrau unterlegt. Die CONT-Kampagnen des IVS sind hervorgehoben.

Die Analyse der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren, die für die Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens durchgeführt wurde, zeigt, dass teilweise große Differenzen zwischen den aus den Raumberechnungen bestimmten Koordinatendifferenzen der Ko-lokationsstationen und den terrestrischen Differenzvektoren bestehen. Um die Genauigkeit der täglichen Referenzrahmen nicht zu stark zu limitieren, muss trotz der geringen Anzahl beteiligter Ko-lokationsstationen eine Auswahl geeigneter terrestrischer Differenzvektoren vorgenommen werden. Das führt jedoch dazu, dass sich die in Abbildung 5.21 dargestellte Situation bezüglich der vorhandenen Ko-lokationen je Session weiter verschlechtert.

Neben den aus terrestrischen Messungen bestimmten Differenzvektoren ist es auch vorstellbar, Differenzvektoren, die aus einem zeitabhängigen Referenzrahmen berechnet wurden, für eine Kombination der täglichen Normalgleichungen zu verwenden. Die Vorteile, die ein solcher Satz berechneter Differenzvektoren bietet, sind vielfältig:

- Aus der Lösung des zeitabhängigen Referenzrahmens können Differenzvektoren für alle Ko-lokationen berechnet werden, auch für diejenigen, für welche keine terrestrischen Messungen vorliegen.
- Alle Differenzvektoren werden auf dieselbe Weise bestimmt, und der Rechenweg ist für alle Ko-lokationsstationen gleichermaßen nachvollziehbar.
- Aus dem zeitabhängigen Referenzrahmen können neben den Differenzvektoren auch deren zeitliche Ableitungen berechnet werden.
- Die Genauigkeit der Differenzvektoren und ihrer zeitlichen Ableitungen wird geschätzt und steht für die tägliche Kombination zur Verfügung.

- Die Differenzvektoren liegen zur mittleren Epoche des betrachteten Zeitraums vor und haben damit im Schwerpunkt der Beobachtungen ihre höchste Genauigkeit.
- Da der zeitabhängige Referenzrahmen, und damit die Differenzvektoren, aus demselben Beobachtungsmaterial berechnet werden wie die täglichen Referenzrahmen, wird eine maximale Konsistenz zwischen den täglichen und dem zeitabhängigen Referenzrahmen erreicht.

Nachteile dieses Vorgehens sind dagegen:

- Die berechneten Differenzvektoren resultieren nicht aus unabhängigen Beobachtungen. Systematiken zwischen den Raumbeobachtungsverfahren können mit ihrer Hilfe nicht aufgedeckt werden.
- Die geschätzten Genauigkeiten der Differenzvektoren sind abhängig von dem für den zeitabhängigen Referenzrahmen geschätzten Varianzniveau. Unzulänglichkeiten in der Bestimmung der Varianzkomponenten bewirken eine Verfälschung der geschätzten Standardabweichungen und damit eine Über- beziehungsweise Unterschätzung der Genauigkeit der Differenzvektoren.
- Differenzvektoren von Ko-lokationsstationen, die weit entfernt von anderen Ko-lokationsstationen liegen, werden möglicherweise schlechter bestimmt als die übrigen, da sich infolge des verwendeten Ausgleichungsmodells nach der Methode der kleinsten Quadrate Widersprüche insbesondere dort niederschlagen.

Der zweite der genannten Nachteile spielt bei der Überlegung, ob gerechnete Differenzvektoren statt der gemessenen verwendet werden können, keine vorrangige Rolle. Denn es stehen auch für die meisten der terrestrisch gemessenen Vektoren keine realistischen Genauigkeitsangaben zur Verfügung.

Da die Vorteile der Einführung berechneter Differenzvektoren sehr groß sind, wird diese Möglichkeit näher untersucht und der Verwendung von terrestrisch bestimmten Differenzvektoren gegenübergestellt. Die Abbildung 5.22 zeigt einen Vergleich der terrestrisch bestimmten und der aus dem zeitabhängigen Referenzrahmen berechneten Differenzvektoren für Ko-lokationen zwischen GPS und VLBI. Die entsprechenden numerischen Werte sind in Tabelle 16 im Anhang gegeben. Die geschätzten Standardabweichungen der Differenzen werden nicht angegeben, da einerseits das absolute Varianzniveau der Lösung (wegen nicht berücksichtigter Korrelationen der GPS-Beobachtungen) als unrealistisch gelten muss und andererseits die Standardabweichungen der gemessenen Differenzvektoren entweder nicht verfügbar oder ebenfalls unrealistisch sind. Um eine grobe Abschätzung zu ermöglichen, welche der Differenzen signifikant sind, werden Standardabweichungen für die berechneten Differenzvektoren aus den täglichen Wiederholbarkeiten der Stationskoordinatenzeitreihen abgeleitet und in Tabelle 16 mit angegeben. Dabei werden zunächst die Standardabweichungen der Stationskoordinaten entsprechend der Gleichung 4.88 und aus diesen anschließend die Standardabweichung der Differenzvektoren berechnet. Die Werte zeigen, dass etwa zwei Drittel der Differenzen in den Nord-, Ost- und Höhenkomponenten signifikant bestimmt sind, wenn die terrestrischen Differenzvektoren als fehlerfrei angenommen werden.

Für mehr als 50 % der Stationen liegt die Diskrepanz zwischen den Differenzvektoren (Abbildung 5.22 (d)) unter 10 mm. Für die Ko-lokationen zwischen der VLBI-Station und den beiden GPS-Stationen (FORT beziehungsweise BRFT) in Fortaleza ergeben sich die größten Differenzen mit rund 35 mm und 25 mm. Die Größenordnungen der Differenzen stimmen damit gut mit denen überein, die aus einem Vergleich der zeitabhängigen Lösungen der Beobachtungsverfahren mit den terrestrisch bestimmten Differenzvektoren erhalten werden (siehe Kapitel 5.2.2.2). Daraus kann zweierlei gefolgert werden: Einerseits lässt die gute Übereinstimmung den Schluss zu, dass die Lagerung der einzelnen verfahrensspezifischen Lösungen auf dem zugrundeliegenden Referenzrahmen gut gelingt und keine signifikanten Datumsunterschiede zwischen der GPS- und VLBI-Lösung bestehen. Würde ein solcher Datumsunterschied existieren, wären die Klaffungen zwischen den Raumbeobachtungsverfahren und den terrestrischen Differenzvektoren bei einem Vergleich der Einzellösungen vom Datumsunterschied beeinflusst und würden sich in der Kombination sichtbar verringern. Zum zweiten kann daraus geschlossen werden, dass die Verknüpfung der Stationsnetze mit Hilfe der Differenzvektoren trotz einer heterogenen globalen Verteilung der Ko-lokationsstationen gut gelingt, und nicht für einzelne, insbesondere exponiert liegende Ko-lokationsstationen, infolge der Kombination eine Zunahme der Differenzen auftritt.

Um einerseits das Potential der terrestrisch bestimmten und der gemessenen Differenzvektoren für die tägliche Kombination vergleichen zu können und um andererseits einen optimalen Grenzwert für die Auswahl der Differenzvektoren festzulegen, werden für beide Sätze von Differenzvektoren Lösungen mit verschiedenen Grenzwerten berechnet. Die Differenzvektoren werden dann akzeptiert und in die Kombination der einzelnen Tagesnormalgleichungen eingeführt, wenn sie sich um höchstens den gewählten Grenzwert von den aus den Raumbeobachtungsverfahren berechneten Koordinatendifferenzen unterscheiden.

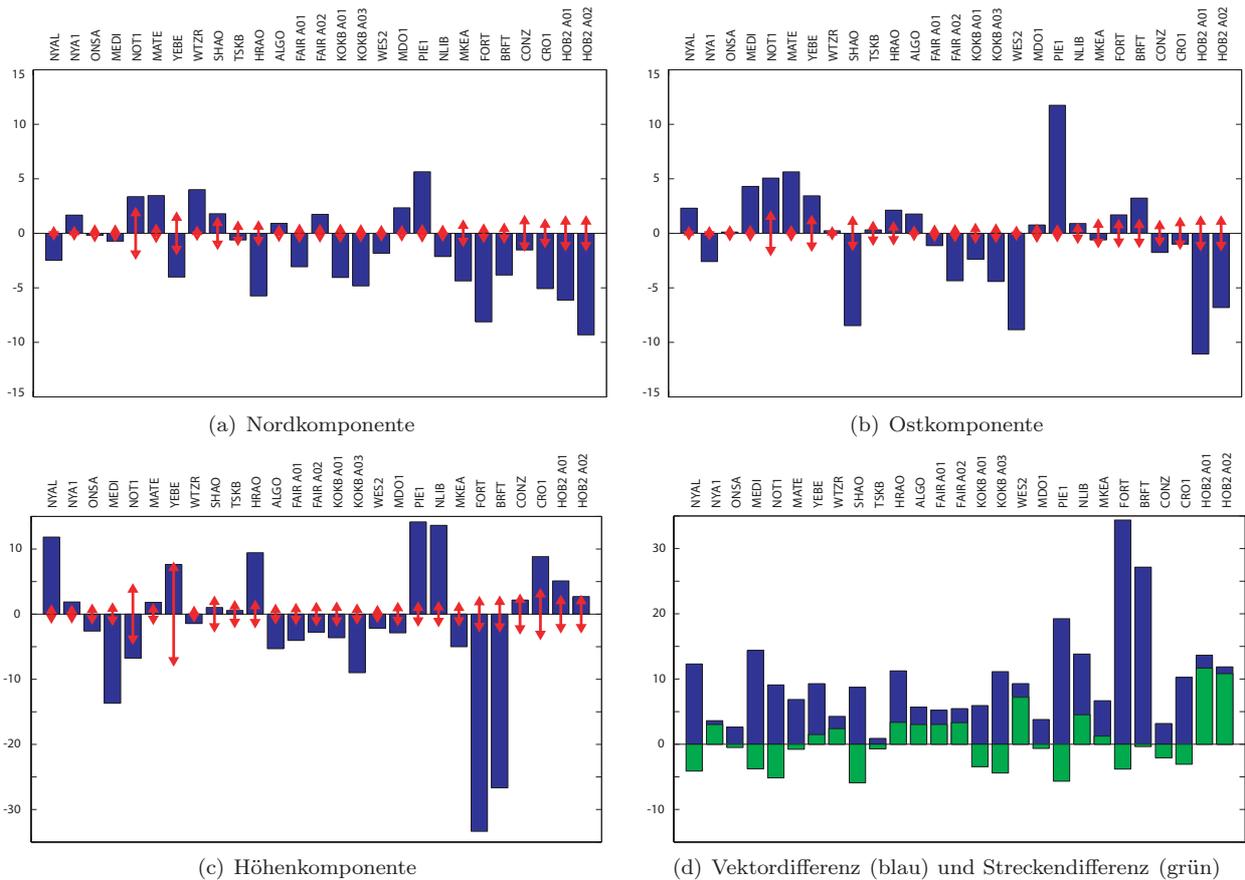


Abbildung 5.22: Vergleich der terrestrisch bestimmten und der aus dem zeitabhängigen Referenzrahmen berechnete Differenzvektoren für die Nord-, Ost- und Höhenkomponente in [mm]. Die Abbildung d) zeigt die Vektordifferenz und die Streckendifferenz. Die roten Pfeile geben die Standardabweichungen an. Die Ko-lokationen sind durch den Namen der jeweils beteiligten GPS-Station gekennzeichnet. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen.

Um die Lösungen hinsichtlich ihrer Konsistenz besser vergleichen zu können, werden zunächst nur die Stationsnetze kombiniert. Die EOP werden für jedes Beobachtungsverfahren separat geschätzt. Eine Standardabweichung von 1 mm für die Komponenten der terrestrischen Differenzvektoren hat sich für die Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens als geeignet erwiesen und wird deshalb auch hier verwendet. Der Ursprung des Netzes wird durch eine NNT-Bedingung, die Orientierung durch eine NNR-Bedingung über ausgewählte GPS-Stationen festgelegt. Wie auch bei der Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens (siehe Kapitel 5.2.2.2) wird die mittlere Differenz der Polkoordinatenzeitreihen herangezogen, um die Konsistenz der Lösungen zu quantifizieren. Die durch die Kombination hervorgerufene Deformation der Stationskoordinatennetze wird durch das mittlere quadratische Residuum der Transformation der kombinierten Lösung auf die Lösung der einzelnen Beobachtungsverfahren beschrieben. Da aber das GPS-Netz im Vergleich zu VLBI wegen seiner hohen Stationsdichte, der großen Anzahl an Beobachtungen und der daraus resultierenden hohen inneren Genauigkeit eine wesentlich geringere Deformation erfährt, die nur bei etwa 10% derjenigen des VLBI-Netzes liegt, wird nur die mittlere Streuung aus der Transformation des VLBI-Netzes betrachtet. Die Abbildung 5.23 zeigt für die verschiedenen Lösungen die mittleren Poldifferenzen, die mittleren Residuen der Transformationen für VLBI und den Anteil der nicht lösbaren Normalgleichungen.

Es wird gefordert, dass mindestens drei Differenzvektoren für eine Tageslösung verwendet werden sollen. Die Anzahl der nicht lösbaren Normalgleichungen umfasst somit alle jene, für die entweder kein, ein oder zwei Differenzvektor(en) zur Verfügung stehen. Die Anzahl von mindestens drei verwendeten Differenzvektoren garantiert bei einem Datumsdefekt des VLBI-Netzes von sechs (drei Translationen und drei Rotationen), dass eine eindeutige Lösung berechnet werden kann. Werden zusätzlich die Polkoordinaten kombiniert, so wird dadurch die Orientierung des Netzes bezüglich der x- und der y-Achse festgelegt, und es sind, wie später noch gezeigt wird, zwei Differenzvektoren ausreichend, um eine eindeutige Lösung zu berechnen. Der Informationsgehalt der separat geschätzten EOP-Reihen ist jedoch für die Auswahl der Differenzvektoren von großer Bedeutung, weswegen die EOP zunächst nicht kombiniert werden.

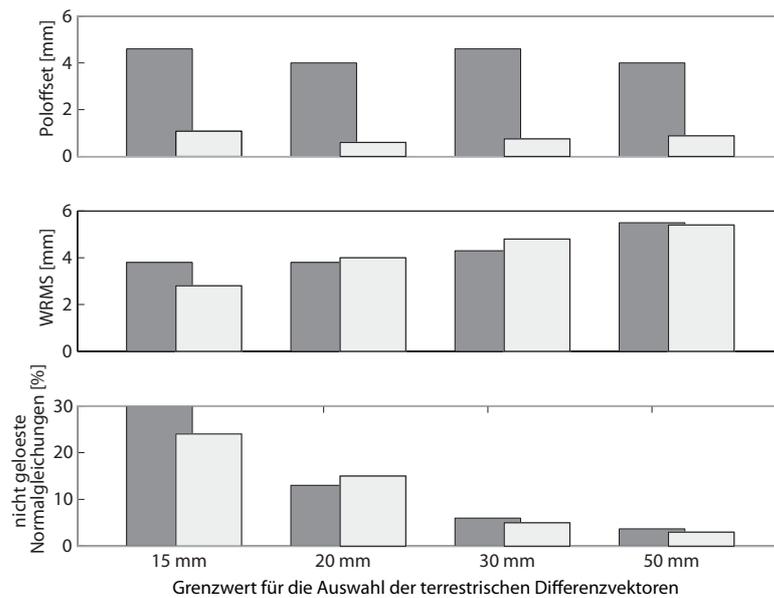


Abbildung 5.23: Vergleich der Lösungen, die unter Verwendung terrestrisch bestimmter Differenzvektoren (dunkelgrau) und berechneter Differenzvektoren (hellgrau) kombiniert wurden, hinsichtlich der mittleren Differenz des Pols (Poloffset), dem mittleren gewichteten Residuum der Transformationen (WRMS) der kombinierten Lösungen auf die VLBI-Lösungen und der Anzahl nicht gelöster Normalgleichungen.

Die in Abbildung 5.23 gezeigte Abhängigkeit des mittleren quadratischen Residuums und der Anzahl der nicht gelösten Tagesnormalgleichungen vom gewählten Grenzwert macht zunächst deutlich, dass auch im Fall berechneter Differenzvektoren eine Auswahl für jede Tageslösung vorgenommen werden muss. Die Ursache dafür ist einerseits, dass die aus VLBI geschätzten Stationspositionen stark variieren, da sich die Konfiguration der VLBI-Netze und damit die Stabilität der Lösung von Session zu Session sehr stark ändert. Andererseits unterscheidet sich die Netzgeometrie der einzelnen Tageslösungen aufgrund der individuellen, zeitvariablen Effekte der Stationspositionen von einer mittleren Netzgeometrie, wie sie der zeitabhängige Referenzrahmen repräsentiert. Die täglichen Wiederholbarkeiten der Stationspositionen in Tabelle 6 im Anhang zeigen, dass für einige VLBI-Stationen insbesondere die Höhenkomponente um mehr als 10 mm variiert. Für die GPS-Stationen ist die Variation im Durchschnitt geringer, was vor allem auf die von Tag zu Tag annähernd gleichbleibende Netzkonfiguration und die hohe Stationsdichte zurückzuführen ist (siehe unten).

Bei Betrachtung der mittleren Poldifferenzen wird ersichtlich, dass bei Verwendung der berechneten Differenzvektoren eine sehr hohe Konsistenz für die kombinierte Lösung erreicht werden kann. Die Poldifferenzen erreichten umgerechnet in eine Entfernung auf der Erdoberfläche Werte von weniger als 1 mm. Im Vergleich dazu kann bei Verwendung der terrestrisch bestimmten Differenzvektoren eine Poldifferenz von minimal 4 mm erreicht werden. Der große Unterschied ist verständlich, da die berechneten Differenzvektoren aus den Lösungen der Raumbenutzungsverfahren abgeleitet wurden und über den gesamten Zeitraum betrachtet, im Mittel keine Systematiken zwischen den Raumbenutzungsverfahren und den Differenzvektoren auftreten. Während die Poldifferenzen für die Lösungen mit gerechneten Differenzvektoren bei Zunahme des Grenzwerts von 20 mm auf 50 mm leicht ansteigen, wird für die Lösungen mit den gemessenen Differenzvektoren keine Zunahme der Poldifferenzen nachgewiesen. Eine Erklärung kann sein, dass einige der ausgewählten terrestrischen Differenzvektoren im Mittel einen systematischen Unterschied zu den Lösungen der Raumbenutzungsverfahren aufweisen, und durch die Einführung dieser Differenzvektoren eine mehr oder weniger gleiche Poldifferenz für alle Lösungen erhalten wird.

Eine Analyse der mittleren Residuen der Transformationen ergibt, dass bei Verwendung sowohl der gerechneten als auch der gemessenen Differenzvektoren die Deformation des VLBI-Netzes in etwa gleichem Maße zunimmt, wenn ein größerer Grenzwert für die Auswahl der Differenzvektoren verwendet wird, also Differenzvektoren mit einer zunehmend schlechteren Übereinstimmung mit den Raumbenutzungsverfahren in die Kombination eingeführt werden. Dieses Ergebnis unterstreicht, dass die Geometrie der Netze der Raumbenutzungsverfahren, berechnet aus den Beobachtungen eines einzelnen Tages, nicht mit der mittleren Geometrie, die aus einem zeitunabhängigen Referenzrahmen erhalten wird, übereinstimmt.

Der untere Teil der Abbildung 5.23 zeigt den Anteil der Normalgleichungen, die bei Verwendung des entsprechenden Grenzwerts nicht gelöst werden können, da weniger als drei Differenzvektoren in die Kombination eingeführt werden. Es fällt auf, dass durch eine Erhöhung des Grenzwerts von 15 mm auf 50 mm der Anteil der nicht gelösten Sessions deutlich zurückgeht. Während der Anteil für einen Grenzwert von 15 mm noch bei 24% beziehungsweise 30% liegt, erreicht er bei einem Grenzwert von 50 mm nur noch etwa 3%.

Ein Vergleich der Lösungen wäre auch denkbar, indem die täglichen Wiederholbarkeiten der Stationskoordinaten betrachtet werden. Insbesondere für einige der weniger gut bestimmten VLBI-Stationskoordinaten werden die täglichen Wiederholbarkeiten kleiner und nähern sich den Werten der GPS-Stationen weiter an, je größer der Grenzwert für die Auswahl der Differenzvektoren gewählt wird. Das zeigt, dass die Kombination des GPS- und VLBI-Netzes durch Verwendung von mehr Ko-lokationsstationen an Stabilität zunimmt. Die täglichen Wiederholbarkeiten sind somit auch ein Maß für die Genauigkeit der Kombination. Sie ermöglichen jedoch keine Aussage über die Konsistenz und die Deformation der Lösung. Sie werden deshalb nicht für den Vergleich der Kombinationslösungen herangezogen.

Die Frage, welcher der Lösungsansätze der beste ist, ist nicht eindeutig zu beantworten, sondern hängt von den Anforderungen an die Lösung ab. Während für die Bereitstellung täglicher Stationskoordinaten und EOP-Werte in nahezu Echtzeit (ein solcher Service wird vom IERS für die EOP bereits angeboten), die Priorität eher darauf liegen wird, Parameter für eine möglichst große Anzahl an Tagen zur Verfügung zu stellen, wird bei Anwendungen, bei denen die Ergebnisse geophysikalisch interpretiert werden sollen, die Forderung eines undeformierten Stationskoordinatennetzes im Vordergrund stehen. Für die weiteren Untersuchungen wird die Lösungsvariante verwendet, die auf einem Grenzwert von 20 mm und der Einführung gerechneter Differenzvektoren basiert. Der Anteil der nicht gelösten Tagesnormalgleichungen liegt im Vergleich zur Lösung mit einem Grenzwert von 15 mm bei nur noch 13% statt 24%, wenngleich die Deformation des Netzes etwas größer ist. Die Poldifferenz ist für alle Lösungen sehr klein, erreicht aber für einen Grenzwert von 20 mm ihren minimalen Wert. Der Satz gerechneter Differenzvektoren wird dem der terrestrisch gemessenen vorgezogen, da die Poldifferenzen signifikant kleinere Werte annehmen und damit die Konsistenz der einzelnen Tageslösungen sehr viel größer ist, als bei Verwendung der gemessenen Vektoren. Hinzu kommt, dass die Anzahl der Differenzvektoren, die je Session verwendet werden können, deutlich größer ist, als bei Verwendung des Satzes gemessener Differenzvektoren. Die Abbildung 5.24 zeigt, wieviele tägliche Kombinationen mit welcher Anzahl gemessener beziehungsweise gerechneter Differenzvektoren berechnet werden können, wenn für die Auswahl der Differenzvektoren ein Grenzwert von 20 mm festgesetzt wird. Während bei Verwendung der gemessenen Differenzvektoren maximal acht Vektoren pro Normalgleichung eingeführt werden können, sind es bei Verwendung gerechneter Vektoren maximal elf. Insgesamt werden im Durchschnitt 1.6 Differenzvektoren mehr pro Lösung eingeführt, wenn gerechnete anstelle gemessener Differenzvektoren gewählt werden.

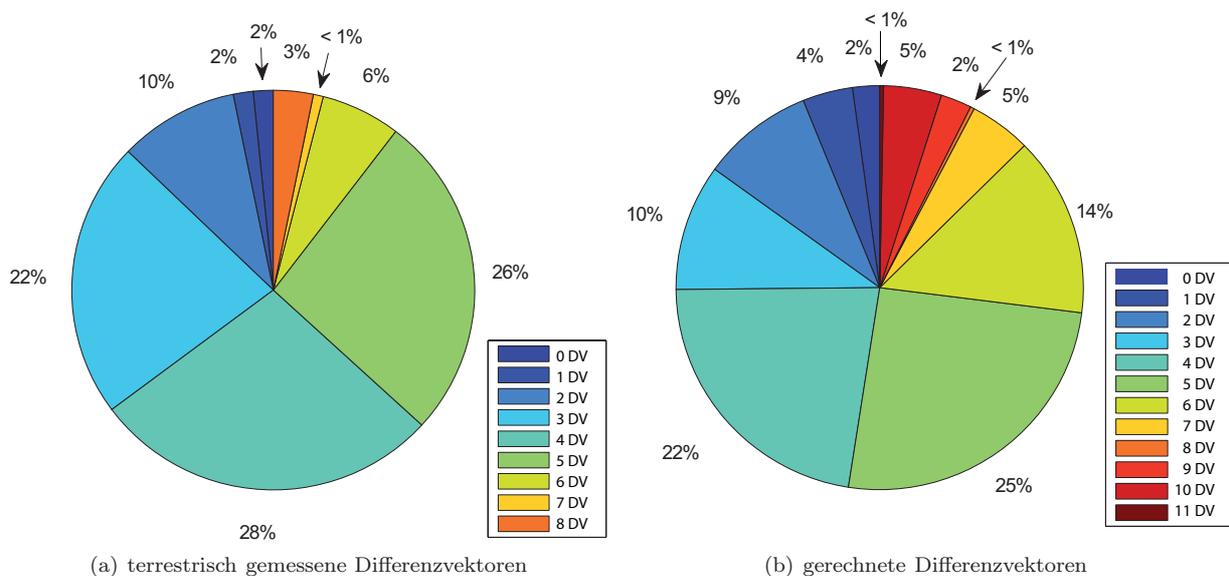


Abbildung 5.24: Anteil der Tageskombinationslösungen, für deren Berechnung eine bestimmte Anzahl ausgewählter Differenzvektoren (DV) zur Verfügung stehen: (a) terrestrisch gemessene Differenzvektoren (b) berechnete Differenzvektoren. Der Grenzwert für die Auswahl der Differenzvektoren beträgt 20 mm.

Dass eine zunehmende Anzahl an Differenzvektoren die Stabilität der einzelnen Lösung erhöht, kann anhand der Standardabweichungen der geschätzten Parameter gezeigt werden. Als Beispiel soll hier die x-Komponente des Pols des kombinierten VLBI-Netzes dienen, die als globaler Parameter die Stabilität der gesamten Lösung repräsentiert. Da die Orientierung nur über GPS-Referenzstationen festgelegt wird, sind die Standardabweichungen der aus den VLBI-Beobachtungen geschätzten Polkoordinaten unmittelbar von der Anzahl der verwendeten Differenzvektoren abhängig. Die Abbildung 5.25 zeigt die mittleren Standardabweichungen der x-Polkomponente des kombinierten VLBI-Netzes, bestimmt aus Tageskombinationslösungen, die mit jeweils derselben Anzahl an Differenzvektoren berechnet wurden. Die Standardabweichungen nehmen mit zunehmender Anzahl der Differenzvektoren exponentiell ab. Während bei Einführung von drei Differenzvektoren die Standardabweichung im Mittel bei etwa 0.28 mas liegt, wird bei Verwendung von zehn Differenzvektoren eine Standardabweichung von nur noch etwa 0.07 mas erhalten. Eine exponentielle Abnahme der Standardabweichungen wird erwartet: Die eingeführten Differenzvektoren sind Beobachtungen, die die Anbindung des VLBI-Netzes an das GPS-Netz, oder anders ausgedrückt, die Lagerung des VLBI-Netzes auf dem GPS-Netz ermöglichen. Die Differenzvektoren sind damit wesentlich für die Übertragung des geodätischen Datums vom GPS- auf das VLBI-Netz. Die Standardabweichungen der Polkoordinaten spiegeln die Genauigkeit wider, mit der die Orientierung vom GPS- in das VLBI-Netz übertragen wird. Je mehr Beobachtungen (Differenzvektoren) zur Verfügung stehen, desto höher wird die Redundanz, und es wird erwartet, dass die Standardabweichung entsprechend dem Fehlerfortpflanzungsgesetz einer einfachen Mittelbildung mit etwa $1/\sqrt{\text{Anzahl der Beobachtungen}}$ abnimmt. Neben der Redundanz hängt die Standardabweichung jedoch auch von der Verteilung der Ko-lokationsstationen ab, weswegen die erhaltene Exponentialfunktion nicht unmittelbar durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz beschrieben werden kann.

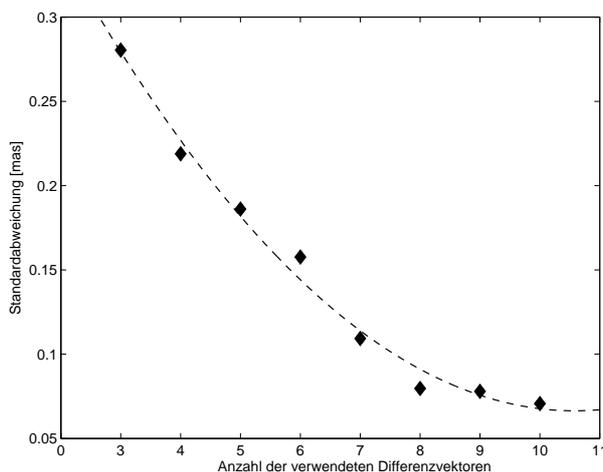


Abbildung 5.25: Abhängigkeit der Standardabweichung der x-Komponente des Pols (VLBI) von der Anzahl der verwendeten Differenzvektoren je Tagesnormalgleichung. Die Rauten geben die mittleren Standardabweichungen an. Die gestrichelte Linie stellt eine ausgleichende Exponentialfunktion für diese Werte dar.

Bisher wurden die täglichen Kombinationslösungen berechnet, indem nur die Stationskoordinaten kombiniert wurden, nicht aber die EOP. Die Kombination der Polkoordinaten bedeutet eine Kombination der Orientierung der Netze bezüglich der Rotation um die x- und y-Achse. Damit ist festgelegt, dass beide Teile des kombinierten Netzes (GPS- und VLBI-Teil) einen gemeinsamen terrestrischen Rotationspol haben. Die Kombination der Polkoordinaten reduziert die Anzahl der erforderlichen Differenzvektoren auf zwei. Dadurch können insgesamt 30 tägliche Kombinationslösungen zusätzlich berechnet werden. Von 326 Tageskombinationen können dann nur 20 nicht gelöst werden, weil jeweils nur ein beziehungsweise kein Differenzvektor für die Kombination verwendet werden kann.

5.3.1.3 Festlegung des geodätischen Datums

Die Festlegung des Koordinatenursprungs sowie der Orientierung der täglichen Lösungen wird realisiert durch eine NNT- beziehungsweise eine NNR-Bedingung über ausgewählte GPS-Referenzstationen in Bezug auf den IGS05. Der Maßstab wird aus den GPS- und VLBI-Beobachtungen gemeinsam bestimmt.

5.3.2 Validierung des zeitunabhängigen Referenzrahmens

5.3.2.1 Analyse der täglichen Wiederholbarkeiten der Stationskoordinaten

Wenn auch die täglichen Wiederholbarkeiten nicht für den Vergleich der Kombinationslösungen herangezogen werden, so sind sie doch ein geeignetes Maß, um den durch die Kombination erreichten Gewinn für die Stationspositionszeitreihen zu quantifizieren. In Abbildung 5.26 sind die täglichen Wiederholbarkeiten der Stationskoordinaten der Ko-lokationsstationen gegenübergestellt, die aus den Kombinationslösungen und den verfahrensspezifischen Lösungen erhalten werden. Für die Berechnung der täglichen Wiederholbarkeiten aus den GPS-Lösungen werden nur die Tage berücksichtigt, an denen auch VLBI-Beobachtungen vorliegen, um eine Vergleichbarkeit mit der kombinierten Lösung zu garantieren. Die berechneten Werte weichen aber nur geringfügig von denen ab, die aus der gesamten GPS-Zeitreihe abgeleitet werden (vergl. Tabelle 4 im Anhang). Werden in Abbildung 5.26 zunächst nur die Wiederholbarkeiten aus den Einzellösungen betrachtet, fällt auf, dass die Werte für die VLBI-Stationen deutlich mehr differieren als das bei GPS der Fall ist. Die größten Wiederholbarkeiten treten für Stationen in Regionen mit einer geringen Stationsdichte auf (auf der Südhalbkugel und in Asien (siehe auch Abbildung 5.4)). Der Grund dafür ist, dass diese Stationen wegen der großen Entfernung zu anderen Stationen weniger Beobachtungen haben. Zudem weisen diese Beobachtungen eine geringere Genauigkeit auf als die kurzer Basislinien, da sie unter niedrigeren Elevationswinkeln stattfinden. Wegen der hohen Stationsdichte hat die Lage der Station bei GPS keinen so starken Einfluss auf die Wiederholbarkeiten, wie das bei VLBI der Fall ist. Technische Probleme die an den VLBI-Stationen auftreten können zu einer Limitierung der Genauigkeit dieser Station führen. Bei GPS-Stationen sind wegen der im Vergleich zu VLBI deutlich geringeren Komplexität der Antennen und Empfänger technische Probleme leichter zu identifizieren und gegebenenfalls zu beheben und beeinträchtigen die Wiederholbarkeiten nur bei wenigen Stationen. Für beide Beobachtungsverfahren gilt, dass die Höhenkomponenten der Stationen etwas schlechter bestimmt sind als die Lagekomponenten. Dieser Effekt resultiert aus der Verteilung der Beobachtungen und Unzulänglichkeiten in der Modellierung. Insbesondere Fehler in der Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung wirken sich verstärkt auf die Höhenkomponente aus.

Ein Vergleich der Wiederholbarkeiten berechnet aus den GPS- und VLBI-Lösungen zeigt, dass die Werte für viele der VLBI-Stationen in derselben Größenordnung wie für die GPS-Stationen liegen oder etwas größer sind, was anhand der bereits genannten Unterschiede der GPS- und VLBI-Stationsnetze erklärt werden kann. Auffallend sind die VLBI-Stationen, deren Stationsnamen in Abbildung 5.26 grau unterlegt sind. Abgesehen von Saint Croix sind die Wiederholbarkeiten dieser Stationen nicht nur sehr viel kleiner als die der meisten anderen VLBI-Stationen, sondern liegen auch unter denen der meisten GPS-Stationen. Die markierten Stationen gehören zum sogenannten *Very Long Baseline Array* (VLBA), einem definierten Netz von Stationen, das in Kapitel 5.1.1 beschrieben wurde. Die Stationen beobachten bis auf wenige Ausnahmen immer in derselben Konstellation (NAPIER 1995). Aufgrund der hohen Dichte des Stationsnetzes und wegen der konstanten Netzgeometrie liefern die VLBA-Sessions einen sehr homogenen Datensatz, wie er aus einem globalen, variablen VLBI-Netz mit einer ungünstigen Stationsverteilung nicht erhalten werden kann. Dreizehn der hier verwendeten 326 VLBI-Sessions sind VLBA-Sessions. Die sechs VLBA-Stationen sind im betrachteten Zeitraum ausschließlich an diesen Sessions beteiligt. Der Vergleich der Wiederholgenauigkeiten der VLBA-Stationen mit denen der anderen Stationen veranschaulicht das Potential eines dichten und homogenen VLBI-Netzes gegenüber einem globalen und variablen VLBI-Netz bei der Bestimmung hochgenauer geodätischer Parameter. Die Kombination wirkt sich auf die Wiederholbarkeiten der GPS- und VLBI-Stationen unterschiedlich aus. Während für die Mehrzahl der VLBI-Stationen mit großen Wiederholbarkeiten diese in der Kombination deutlich kleiner werden, profitieren die GPS-Stationen von der Kombination nur in geringem Maße. Allerdings kann auch für mehr als die Hälfte der GPS-Stationen ein kleiner Rückgang der Wiederholbarkeiten im Bereich von wenigen Zehntelmillimetern festgestellt werden. Das zeigt, dass beide Verfahren, insbesondere aber die schwächer bestimmten VLBI-Stationen, von der Kombination mit unabhängigen Beobachtungen profitieren. Bei Betrachtung der VLBA-Stationen fällt jedoch auf, dass die Wiederholbarkeiten aller Komponenten infolge der Kombination zunehmen. Die Ursache dafür ist, dass die VLBA-Stationen mit einer besseren täglichen Wiederholbarkeit bestimmt werden als die zugehörigen GPS-Stationen. Da die VLBI-Stationen aber sehr viel weniger Beobachtungen liefern und damit größere Standardabweichungen aufweisen als die GPS-Stationen, wird das VLBI-Stationsnetz in der Kombination stärker deformiert als das GPS-Netz. Die Wiederholbarkeiten der VLBI-Stationen nähern sich dabei denen der GPS-Stationen an. Für die VLBA-Sessions kann somit, was die Wiederholbarkeiten der Stationskoordinaten betrifft, kein Gewinn durch die Kombination erreicht werden.

Die in Kapitel 5.1.1 beschriebenen CONT-Kampagnen des IVS haben eine ganz ähnliche Zielsetzung wie das VLBA-Projekt, betrachten jedoch globale VLBI-Netze. An den beiden Kampagnen CONT02 und CONT05, die in dem in dieser Arbeit berücksichtigten Zeitraum stattfanden, waren acht beziehungsweise elf Stationen

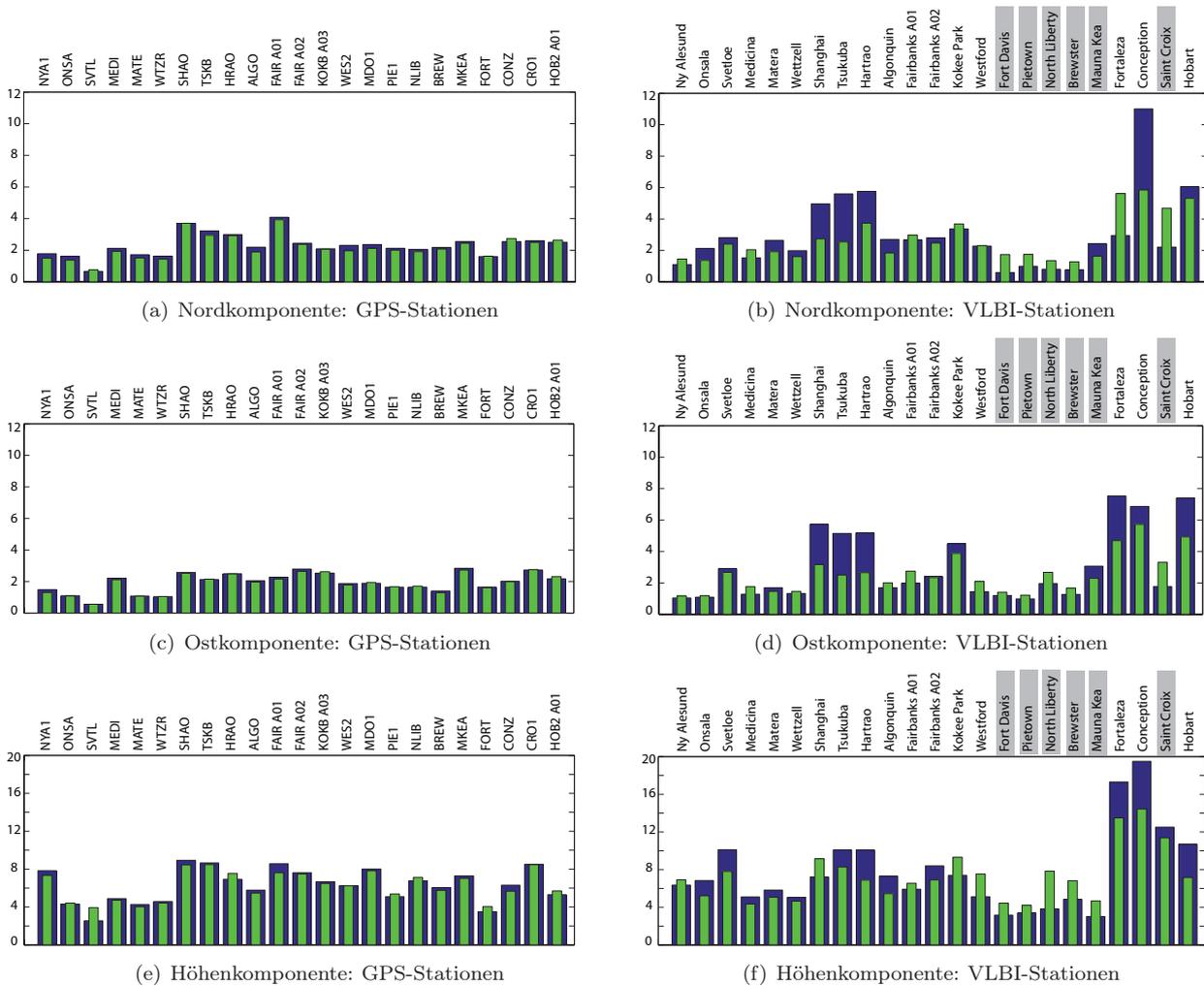


Abbildung 5.26: Tägliche Wiederholbarkeiten (in [mm], gewichtet) der Stationskoordinaten der Ko-lokationsstationen: GPS- beziehungsweise VLBI-Lösung (blau), Kombinationslösung basierend auf gerechneten Differenzvektoren, die mit einem Grenzwert von 20 mm ausgewählt wurden (grün). Die Namen der Stationen des VLBA-Netzes sind grau unterlegt.

beteiligt, die über einen Zeitraum von 15 Tagen je Kampagne beobachteten. Im Vergleich zu den Zeitreihen der VLBA-Stationen, die jahreszeitliche Signale enthalten, sind die Stationskoordinatenzeitreihen aus den CONT-Kampagnen nahezu frei von saisonalen Effekten. Um die Auswirkung einer konstanten Netzgeometrie und der erhöhten Anzahl an Beobachtungen auf die Wiederholbarkeiten von dem Effekt zu trennen, der dem Nichtvorhandensein jahreszeitlicher Signale zuzuordnen ist, werden für die an den CONT-Kampagnen beteiligten Stationen Wiederholbarkeiten aus den herkömmlichen Sessions über einen Zeitraum von zwei Monaten berechnet. Diese Zeitspanne wurde gewählt, da einerseits der Einfluss der jahreszeitlichen Effekte noch gering ist, und andererseits die Mehrzahl der an den CONT-Kampagnen beteiligten Stationen in dieser Zeit in zehn bis 20 Sessions beobachtete, was in etwa dem Beobachtungsumfang der Kampagnen entspricht. Es werden jeweils die Sessions aus den beiden Monaten vor den CONT-Kampagnen für die Vergleiche ausgewählt. Die Wiederholbarkeiten der Stationen werden für die beiden Kampagnen separat berechnet und sind in Abbildung 5.27 dargestellt. Stationen, die im Vergleichszeitraum an weniger als acht Sessions beteiligt waren, werden nicht berücksichtigt.

Der Vergleich der Wiederholbarkeiten aus den CONT-Kampagnen mit denen, die aus den Vergleichszeiträumen von zwei Monaten berechnet werden, zeigt, dass für die Mehrzahl der Stationskoordinaten aus der CONT02-Kampagne geringfügig bessere Wiederholbarkeiten erhalten werden. Einige der Komponenten werden aus der CONT02-Kampagne aber auch etwas schlechter bestimmt, so zum Beispiel die Lagekomponenten der Station Kokee Park. Die Wiederholbarkeiten, die aus der CONT05-Kampagne erhalten werden, sind hingegen für die meisten der Stationen deutlich kleiner, als die aus dem Vergleichszeitraum bestimmten Werte. Die CONT-Kampagnen zeigen damit, ebenso wie die VLBA-Sessions, dass die Genauigkeit der aus VLBI bestimmten geodätischen Parameter gesteigert werden kann, wenn die Stationsdichte und damit die Beobachtungsdichte erhöht wird und die Netzkonfiguration über alle Sessions gleich ist.

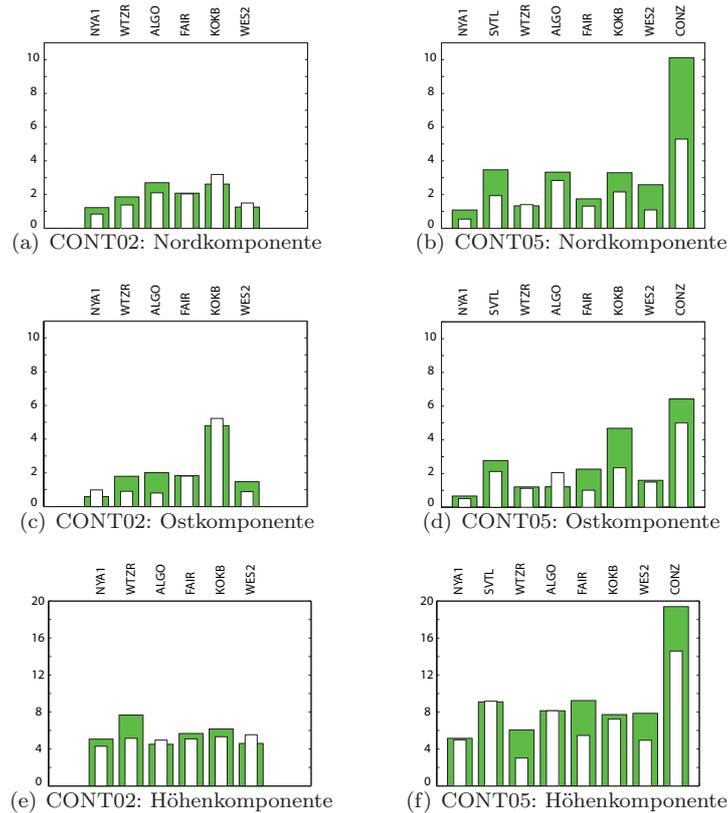


Abbildung 5.27: Tägliche Wiederholbarkeiten (in [mm]) der Stationskoordinaten der VLBI-Ko-lokationsstationen, berechnet aus einem Zeitraum von zwei Monaten (grün) und aus den CONT-Kampagnen (weiß). Die Wiederholbarkeiten wurden unter Berücksichtigung der Standardabweichungen berechnet.

5.3.2.2 Analyse der Erdrotationsparameter

Um die Verbesserung der Erdrotationsparameter durch die Kombination zu quantifizieren, wird die Streuung der Zeitreihen gegenüber einer Referenzreihe herangezogen. Die Referenz wird ebenso gewählt, wie es für die Analyse der EOP in Kapitel 5.2.3.3 beschrieben wurde. Es werden Streuungen mit und ohne Berücksichtigung der Standardabweichungen berechnet. Sie sind in Tabelle 5.18 zusammengefasst. Die Streuung der Polkoordinaten wird durch die Kombination stark verringert. Für GPS liegt die Abnahme für die y-Komponente des Pols bei etwa 14%, für die x-Komponente bei rund 20%. Im Vergleich zu VLBI zeigen die kombinierten Polkoordinatenreihen ein um 20-30% geringeres Rauschen. Werden die Standardabweichungen nicht für die Berechnung der Streuung herangezogen, geht die Streuung durch die Kombination um etwa die Hälfte zurück. Für UT1-UTC ist eine Zunahme des WRMS durch die Kombination zu erkennen. Bei Betrachtung der RMS-Werte wird aber deutlich, dass die Streuung abnimmt. Das bedeutet, dass die geschätzten Standardabweichungen für UT1-UTC nicht in jedem Fall die Abweichung von der Referenzreihe repräsentieren. Die Nutationsparameter profitieren ebenfalls von der Kombination. Die WRMS-Werte verringern sich um etwa 6%, die RMS-Werte um etwa 30%-40%. Ein Vergleich der aus den Nutationszeitreihen berechneten WRMS- und RMS-Werte zeigt, dass die Standardabweichungen die Stabilität der einzelnen Lösung gut repräsentieren.

Bezüglich ihrer generellen Aussagen stimmen die Ergebnisse gut mit denen der EOP-Reihen überein, die gemeinsam mit dem zeitabhängigen Referenzrahmen ausgeglichen werden (Kapitel 5.2.3.3). Für die Polkoordinaten erreicht die Streuung der aus den täglichen Kombinationen berechneten EOP-Reihen jedoch etwa das 1.5- bis 1.7-fache der Streuung dieser Reihen. Für die Nutationswinkel und UT1-UTC wird nur ein Faktor von maximal 1.2 erhalten. Der Vergleich ist jedoch nur unter Vorbehalt möglich, da bei der Berechnung des zeitunabhängigen Referenzrahmens im Gegensatz zum zeitabhängigen Referenzrahmen die zeitlichen Ableitungen der Nutationswinkel nicht parametrisiert sind.

Tabelle 5.18: Streuung der Erdrotationsparameter. Die Streuung der Polkoordinaten und UT1-UTC ist gegenüber IERS EOP 05 C04 angegeben, wobei die Zeitreihen zusätzlich um eine mittlere Differenz und eine zeitlich lineare Änderung gegenüber IERS EOP 05 C04 reduziert wurden. Die Streuung der Nutationsparameter ist in Bezug auf das Nutationsmodell IAU2000 und einer geschätzten Sinusfunktion mit einer Periode von 432 Tagen angegeben.

	X-Pol [mas]	Y-Pol [mas]	UT1-UTC [ms]	$\Delta\psi \cdot \sin(\epsilon_0)$ [mas]	$\Delta\epsilon$ [mas]
WRMS					
GPS	0.1790	0.1808	/	/	/
VLBI	0.1997	0.1935	0.0123	0.1101	0.1062
kombiniert	0.1435	0.1550	0.0131	0.1052	0.0980
RMS					
GPS	0.1850	0.1913	/	/	/
VLBI	0.3008	0.3032	0.0200	0.2500	0.2298
kombiniert	0.1500	0.1596	0.0165	0.1526	0.1506

5.3.2.3 Validierung der Stationskoordinatenzeitreihen

Für eine unabhängige Validierung der Zeitreihen der Stationshöhen bietet sich ein Vergleich mit den aus einem geophysikalischen Auflastmodell abgeleiteten Stationsbewegungen an. In Kapitel 2.4.4 wurden die verschiedenen Massenvariationen beschrieben, die zu einer Deformation der Erdkruste und damit zu Variationen der Stationskoordinaten, insbesondere der Stationshöhen, führen. Zwar liegt die Genauigkeit der aus den Ozean-, Atmosphären- und Hydrologiemodellen ableitbaren Auflastdeformation nur im Bereich von einigen Millimetern und reicht nicht an die der Stationskoordinatenzeitreihen heran, dennoch kann durch einen Vergleich mit den modellierten Stationsbewegungen abgeschätzt werden, inwieweit Auflastdeformationen die Ursache für saisonale Variationen der Stationspositionen sind.

Die Berechnung der durch die Auflasten verursachten vertikalen Deformation der Erdkruste erfolgt mit Hilfe eines einfachen auf LOVESchen Zahlen und GREENSchen Funktionen basierenden Ansatzes (FARRELL 1972). Die Variationen der Ozeanwassermassen und der Atmosphärenmassen werden aus konsistenten Datensätzen berechnet: Atmosphärische Oberflächendruckdaten der National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) (KALNAY *et al.* 1996) und Ozeanbodendruckfelder des Ozeanzirkulationsmodells ECCO (FUKUMORI 2002). Die Variationen der kontinentalen Wassermassen werden aus dem Hydrologiemodell LaD (MILLY und SHMAKIN 2002) entnommen (vergl. Kapitel 2.4.4). Aus den Modellen werden die Auflastdeformationen global mit einer räumlichen Auflösung von $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ und einer zeitlichen Auflösung von einer Woche berechnet (SEITZ und KRÜGEL 2009). Kurzzeitige Massen- und damit Höhenvariationen mit Perioden von weniger als einer Woche werden nicht erfasst.

In Abbildung 5.28 sind die aus der täglichen Kombination abgeleiteten Zeitreihen der GPS- und VLBI-Stationshöhen und die modellierte Auflastdeformation für sechs Stationen exemplarisch dargestellt. Außerdem sind die aus den GPS-Lösungen resultierenden kontinuierlichen Zeitreihen abgebildet. Tabelle 5.19 enthält die Streuung der Differenzen und die Korrelationen der einzelnen Zeitreihen. Da die Kombinationslösungen nicht kontinuierlich (also täglich) vorliegen, werden für die Berechnung der Streuungen und Korrelationen keine Mittelwerte aus sieben Tagen berechnet. Die Streuungen und Korrelationen werden auf Basis täglicher Werte berechnet, wobei die wöchentlichen Modellwerte für jeden Tag der jeweiligen Woche als gültig angenommen werden.

Die aus GPS erhaltenen kontinuierlichen Zeitreihen werden mit dem Modell verglichen. Um den Einfluss kurzzeitiger Variationen der Stationszeitreihen auf die Ergebnisse auszuschließen, werden die Zeitreihen und Modellwerte zunächst mit einem gleitenden Medianfilter mit einer Filterbreite von 14 Tagen gefiltert.

Werden zunächst die GPS- und VLBI-Zeitreihen verglichen, die aus der Kombination erhalten werden, zeigt sich für alle Stationen eine gute Übereinstimmung. Die Streuungen für Wettzell, Medicina und Matera liegen unter 3 mm. Die Korrelationen sind für alle Stationen größer als 0.65. Für Wettzell wird die beste Übereinstimmung erhalten. Die Streuung beträgt nur 1.6 mm und die Korrelation 0.93. Für die Stationen Westford und Onsala weisen die Differenzen die größten Streuungen auf, und die Korrelationen sind ebenfalls geringer als für die übrigen Stationen. Onsala war jedoch nur an wenigen VLBI-Sessions beteiligt, die zudem sehr unregelmäßig über den gesamten Zeitraum verteilt waren. Das Ergebnis soll deshalb nicht interpretiert werden. Für Westford kann das Ergebnis auf die große Streuung der individuellen Zeitreihen der Stationshöhen zurückgeführt werden (vergl. Abbildung 5.28).

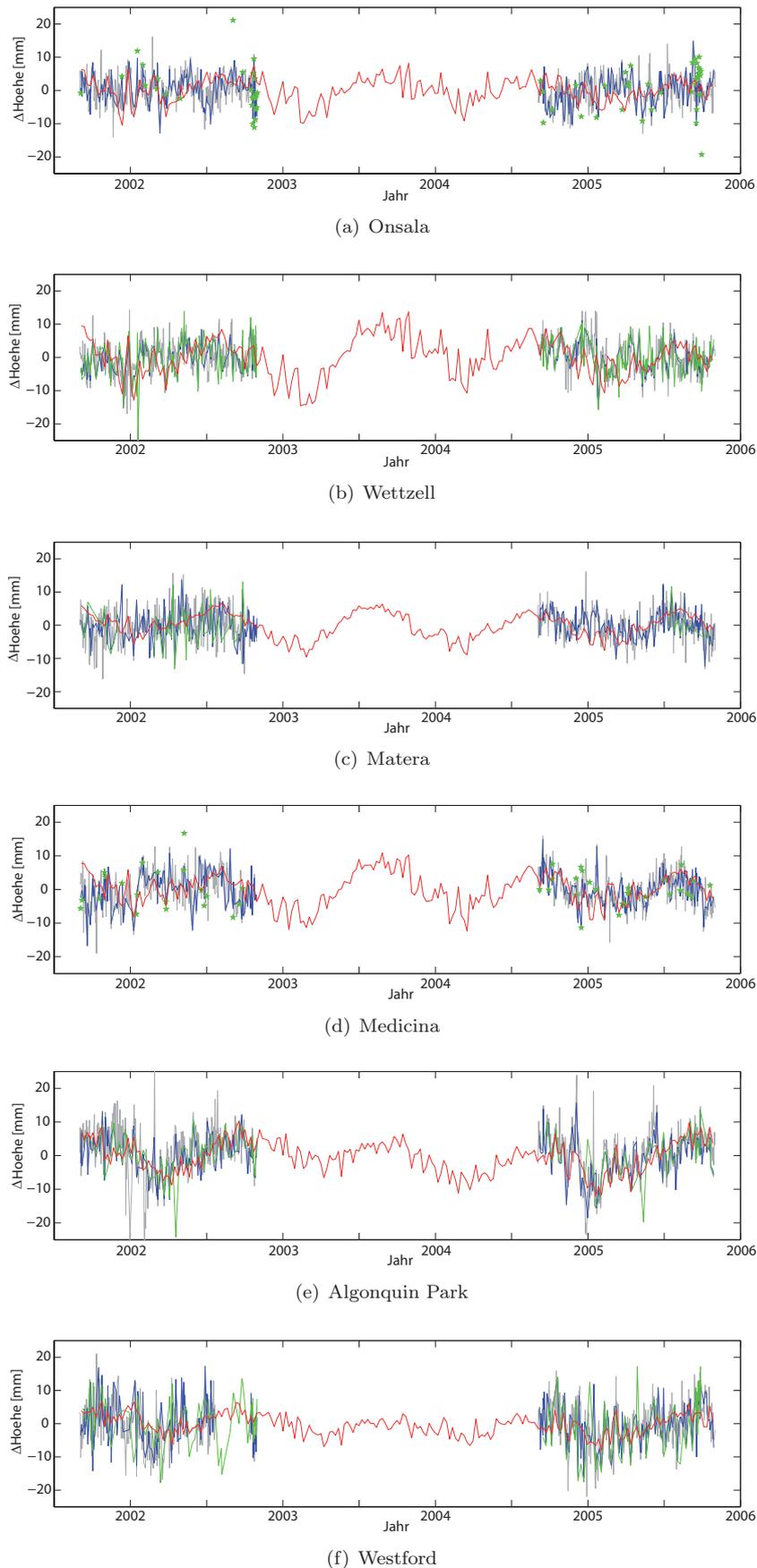


Abbildung 5.28: Zeitliche Variation der Stationshöhe für sechs ausgewählte Stationen. Die Zeitreihen resultieren aus täglichen GPS-Lösungen (grau), täglichen Kombinationslösungen (GPS (blau), VLBI (grün)) und Modellrechnungen mit wöchentlicher Auflösung (rot). Für VLBI-Stationen, die nur an wenigen Tagen beobachtet haben, sind die Positionen als Punkte dargestellt und nicht durch Linien verbunden.

Tabelle 5.19: Korrelationen sowie die Streuung der Differenzen der Zeitreihen der Stationshöhen und modellierter Höhenvariationen für sechs ausgewählte Stationen. Es werden die kombinierten Zeitreihen verwendet sowie die Zeitreihen, die aus den GPS-Lösungen resultieren.

Station	GPS-, VLBI-Station	GPS - VLBI	GPS(komb.) - Modell	VLBI(komb.) - Modell	GPS - Modell	GPS* - Modell*
Streuung der Differenz [mm]						
Algonquin Park	ALGO 7282	3.6	5.2	5.1	6.2	3.8
Wetzell	WTZR 7224	1.6	5.8	6.5	6.1	4.6
Medicina	MEDI 7230	2.1	5.3	6.3	5.2	3.5
Onsala	ONSA 7213	5.7	5.4	8.9	5.0	3.4
Matera	MATE 7243	2.7	4.8	5.6	4.8	2.9
Westford	WES2 7209	5.4	6.3	6.9	5.4	3.7
Korrelationen						
Algonquin Park	ALGO 7282	0.80	0.54	0.59	0.50	0.68
Wetzell	WTZR 7224	0.93	0.17	0.16	0.14	0.14
Medicina	MEDI 7230	0.88	0.25	0.06	0.29	0.40
Onsala	ONSA 7213	0.67	0.07	0.12	0.16	0.15
Matera	MATE 7243	0.86	0.14	0.08	0.21	0.39
Westford	WES2 7209	0.75	0.36	0.36	0.37	0.49
* gleitender Median über 14 Tage						

Die Beschreibung der Höhenvariation durch das Modell gelingt für die sechs Stationen etwa gleich gut. Die Streuungen erreichen für alle Vergleiche, die auf täglichen Differenzen basieren, Werte von 4.8 mm bis 6.9 mm (abgesehen von der VLBI-Station in Onsala). Die Streuungen, die für den Vergleich der median-gefilterten Zeitreihen erhalten werden, erreichen Werte von 3 mm bis 4.6 mm. Die Korrelationen weisen im Gegensatz zu den Streuungen große Unterschiede auf, was auch auf die unterschiedlich starke Ausprägung saisonaler Signale in den Zeitreihen zurückzuführen ist (siehe Abbildung 5.28). Für die Station Algonquin Park werden die größten Korrelationen erhalten. Sie liegen bei etwa 0.5 bis 0.6. Die Korrelation zwischen der median-gefilterten GPS- und der Modellreihe erreicht 0.68. Für die GPS- und VLBI-Stationen in Onsala und Wetzell sind die Korrelationen mit den Modellzeitreihen klein. Sie erreichen nur Werte von maximal 0.17.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die täglichen Variationen der Stationshöhen mit einer mittleren Genauigkeit von etwa 5.5 mm durch das Modell approximiert werden. Variationen mit Perioden von mehr als 14 Tagen werden dagegen im Mittel auf 3.7 mm genau erfasst. Anhand der Abbildungen der Stationen Algonquin Park und Medicina wird deutlich, dass vor allem die saisonalen Variationen gut durch das Modell beschrieben werden. Es kann deshalb für diese Stationen geschlussfolgert werden, dass die saisonale Variation der Höhenkomponente geophysikalisch bedingt ist und dass mögliche Unzulänglichkeiten in der Modellierung nicht in der Hauptsache ursächlich für die saisonalen Variationen sind. Da jedoch in diese Vergleiche nur Beobachtungen aus zwei Jahren eingehen, können keine generell gültigen Aussagen über die Übereinstimmung der aus GPS- und VLBI bestimmten Variationen und die Genauigkeit der verwendeten Auflastmodellierung gemacht werden.

5.4 Vergleich und Kombination von Troposphärenparametern

5.4.1 Vergleich von Troposphärenparametern

In Kapitel 3.1.2.1 wurde die troposphärische Laufzeitverzögerung der Mikrowellen als ein Effekt beschrieben, der die GPS- und die VLBI-Beobachtungen in gleicher Weise beeinflusst. Für die Auswertungen der Beobachtungen beider Verfahren wurde das Modell von Saastamoinen (SAASTAMOINEN 1972) unter Verwendung der Eigenschaften einer Standardatmosphäre für die Berechnung eines konstanten Anteils der troposphärischen Laufzeitverzögerung verwendet (siehe auch Kapitel 5.1.1). Dieser entspricht näherungsweise dem trockenen Anteil und ist nur abhängig von der ellipsoidischen Höhe der Station. Ein variabler Anteil, der in etwa dem feuchten Anteil entspricht, wird geschätzt. Für beide Anteile erfolgt die Umrechnung von der Elevation der Beobachtungs-

richtung auf die Zenitrichtung mit Hilfe entsprechender Übertragungsfunktionen von NIELL (1996). Infolge der identischen Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerungen für die GPS- und VLBI-Beobachtungen können die auf Ko-lokationsstationen geschätzten Parameter als gemeinsame Parameter der beiden Verfahren angesehen werden. Der Höhenunterschied der beiden Stationen bewirkt jedoch eine Differenz in der troposphärischen Laufzeitverzögerung. Bei der Berechnung der Näherungswerte wird die Stationshöhe berücksichtigt. Aber auch die geschätzten Parameter der beiden Stationen unterscheiden sich um einen Wert, der aus dem Höhenunterschied resultiert. Dieser Wert wird unter Verwendung des Modells von Saastamoinen berechnet. Da angenommen wird, dass die geschätzten Parameter nur den feuchten Anteil der Laufzeitverzögerung repräsentieren, wird nur der Teil des Modells verwendet, der von Temperatur und Dampfdruck abhängig ist. Für die Berücksichtigung der Abhängigkeit der Temperatur und des Dampfdrucks von der Stationshöhe werden nicht die in Kapitel 3.1.2.1 angegebenen und in der GPS- und VLBI-Auswertesoftware implementierten Gleichungen von BERG (1984), sondern die Gleichungen von BRUNNER und RÜEGER (1992) verwendet, die eine verfeinerte Modellierung ermöglichen:

$$T(h) = T_0 - \Gamma \cdot (h - h_0) \quad (5.6)$$

$$e(T) = \frac{H}{100} \cdot e_{sat}(T), \quad (5.7)$$

wobei h_0 die ellipsoidische Höhe in [m] ist, für welche die Referenzwerte für die Temperatur T_0 in [K] und den Dampfdruck e_0 in [mbar] bekannt sind; h ist die Höhe in [m], für welche Temperatur und Dampfdruck berechnet werden sollen. Die Konstante $\Gamma = 0.00977 \text{ K/m}$ ist der mittlere vertikale Temperaturgradient. Die relative Luftfeuchte H wird für bodennahe Luftschichten als von der Höhe unabhängig angenommen, jedoch ist der Sättigungsdampfdruck e_{sat} abhängig von der Temperatur in [K]:

$$e_{sat}(T) = \exp\left(2.3026 \cdot \left(0.7858 + \frac{7.5 \cdot (T - 273.15)}{T - 273.15 + 237.3}\right)\right). \quad (5.8)$$

Unter Verwendung der Gleichungen 5.6 und 5.7 gibt THALLER (2008) eine auf dem Modell von Saastamoinen beruhende Gleichung zur Berechnung der Differenz ΔZWD des feuchten Anteils der Laufzeitverzögerung $\Delta \rho_w$ in Abhängigkeit von der Höhendifferenz an:

$$\Delta ZWD = \Delta \rho_{feucht_0} - \Delta \rho_{feucht} = -2.789 \frac{e_0}{T_0^2} \cdot \left(\frac{5383}{T_0} - 0.7803\right) \cdot \Gamma \cdot (h - h_0). \quad (5.9)$$

Für die Mehrzahl der VLBI-Stationen werden parallel zu den VLBI-Beobachtungen meteorologische Daten gemessen. Die Messdaten sind in den VLBI-Beobachtungsdateien enthalten, die unter <ftp://ivs.bkg.bund.de/pub/vlbi/ivsdata/ngs> vom IVS zur Verfügung gestellt werden. Damit bietet sich die Möglichkeit, statt der Parameter einer Standardatmosphäre, meteorologische Messungen in die Berechnung von ΔZWD einzuführen, die den tatsächlichen Zustand der bodennahen Atmosphärenschicht beschreiben. Die gemessene Temperatur und der aus der gemessenen Luftfeuchte H nach der Gleichung 5.7 berechnete Dampfdruck gehen somit als Referenzdaten T_0 und e_0 in die Gleichung 5.9 ein. Abbildung 5.29 zeigt die Zeitreihen der auf Grundlage von meteorologischen Messdaten modellierten Differenzen im feuchten Anteil der Laufzeitverzögerung für die beiden Stationen Wettzell und Tsukuba für jeweils vier Jahre von 2001 bis 2004. Zudem zeigt die Abbildung die jeweils gemessenen Werte für Temperatur und Dampfdruck auf Höhe der VLBI-Station.

Die Zeitreihen beider Stationen zeigen ein signifikantes Jahressignal, welches aus der saisonalen Variation der Temperatur und damit des Dampfdrucks resultiert. Für Wettzell, wo die GPS- und die VLBI-Station einen Höhenunterschied von etwa 3 m aufweisen, ist die saisonale Variation mit einer Amplitude von weniger als 0.5 mm sehr klein. Für die Station Tsukuba mit einem Höhenunterschied von rund 17.5 m erreicht ΔZWD jedoch einen Wert von maximal 3 mm. Folglich kann bei einem Vergleich der aus GPS und VLBI geschätzten Laufzeitverzögerung keine zeitlich konstante Differenz angenommen werden. Sie muss für jeden Zeitpunkt, zu dem Schätzwerte vorliegen, berechnet werden. Dies ist wiederum nur dann möglich, wenn meteorologische Messungen für die Stationen vorliegen, da ein Standardatmosphärenmodell zeitliche Variationen der Atmosphäre

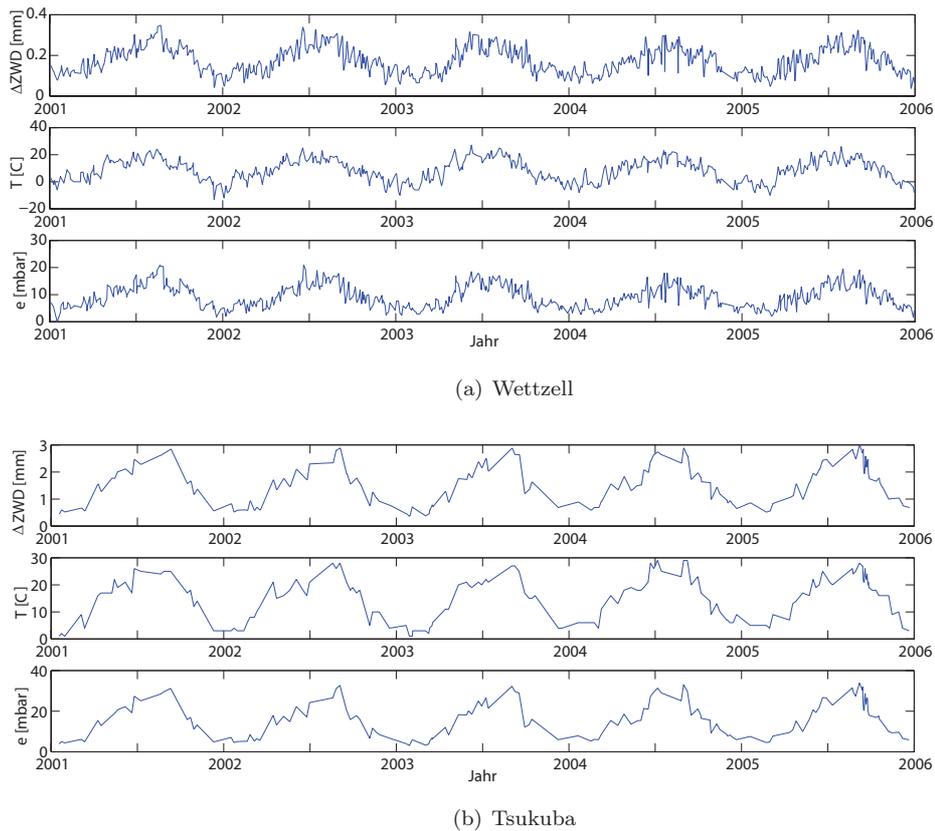


Abbildung 5.29: Differenz der feuchten Laufzeitverzögerung ΔZWD (GPS - VLBI) berechnet aus der für die VLBI-Station gemessenen Temperatur T und dem Dampfdruck e für die Stationen (a) Wettzell ($\Delta h = 3$ m) und (b) Tsukuba ($\Delta h = 17.5$ m).

nicht berücksichtigt. Statt der direkt auf der Station erfassten meteorologischen Beobachtungen könnten auch Zeitreihen verwendet werden, die aus einem globalen atmosphärischen Datensatz, wie beispielsweise dem des ECMWF erhalten werden. Jedoch ist die räumliche Auflösung dieser Daten mit maximal $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ möglicherweise zu schlecht, um die meteorologischen Gegebenheiten auf einer Station mit der Genauigkeit aus dem Modell abzuleiten, wie sie durch direkte Messungen auf der Station beschrieben werden können.

Um die Abhängigkeit der mit Gleichung 5.9 berechneten Differenz ΔZWD von Temperatur, Luftfeuchte und Höhendifferenz zwischen den Stationen zu demonstrieren, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dafür wird ΔZWD für verschiedene Höhendifferenzen zwischen 1 m und 20 m, Temperaturen von -20°C bis 40°C und Luftfeuchtwerten von 30% bis 100 % berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.30 dargestellt. Während der Wert für ΔZWD mit linear zunehmender Luftfeuchte ebenfalls linear ansteigt, nimmt er für einen linearen Temperaturanstieg exponentiell zu. So wird für einen Höhenunterschied von 10 m und einer Luftfeuchte von 90% bei einem Temperaturanstieg von 20°C auf 30°C eine Änderung für ΔZWD von 0.7 mm erhalten. Bei einem Höhenunterschied von 20 m beträgt die Änderung bereits 1.5 mm. Seien für eine Station in den mittleren Breiten auf der Nordhalbkugel ein kalter, trockener Wintertag mit Temperaturen um -20°C und einer Luftfeuchte von 70% und ein warmer feuchter Sommertag mit einer Temperatur von 30° und einer Luftfeuchte von 90% angenommen, so beträgt die Differenz für ΔZWD 1.8 mm bei einem Höhenunterschied von 10 m und 3.7 mm bei einem Höhenunterschied von 20 m.

Die Troposphärengradienten der Ko-lokationsstationen sind wie die troposphärische Laufzeitverzögerung gemeinsame Parameter der beiden Raumberechnungsverfahren, sofern die Parametrisierung auf die gleiche Weise erfolgt. In Kapitel 5.1.1 wurde bereits erwähnt, dass in den GPS- und VLBI-Beobachtungsgleichungen unterschiedliche Übertragungsfunktionen für die Gradienten verwendet wurden. Der Effekt auf die Gradienten ist aber vernachlässigbar. Im Gegensatz zur Laufzeitverzögerung kann der Vergleich und die Kombination der aus verschiedenen Beobachtungsverfahren abgeleiteten Gradienten direkt erfolgen, da sich für horizontale Entfernungen von wenigen Kilometern die Azimutabhängigkeit der troposphärischen Laufzeitverzögerung nicht ändert und damit die Gradienten gleich sind.

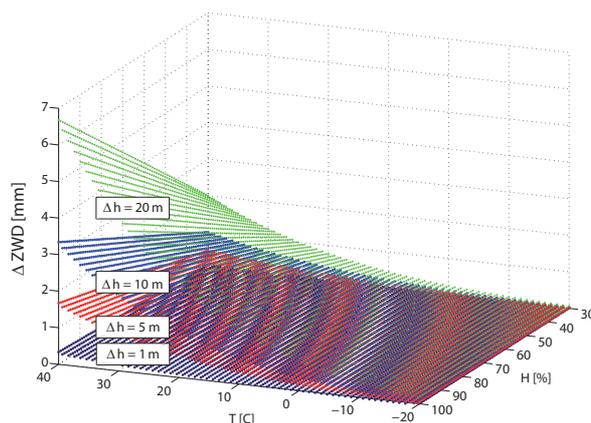


Abbildung 5.30: Abhängigkeit der Differenz ΔZWD zweier Stationen von der Änderung der Temperatur, der Änderung der Luftfeuchte und vom Höhenunterschied.

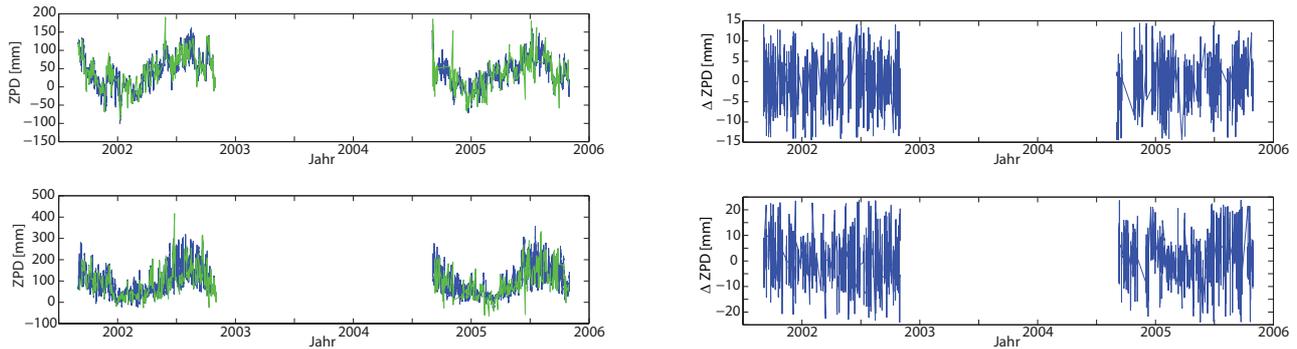
Die Abbildung 5.31 zeigt die Zeitreihen der troposphärischen Laufzeitverzögerung und der troposphärischen Gradienten, bestimmt aus GPS und VLBI exemplarisch für die Stationen Ny Ålesund und Algonquin Park. Dargestellt sind auch die Differenzen zwischen GPS und VLBI. Für die Laufzeitverzögerung wurden die Differenzen um die aus dem Modell berechneten Werte korrigiert. Für die Laufzeitverzögerung wird eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den aus den beiden Verfahren abgeleiteten Parametern erkennbar. Das betrifft einerseits den zeitlichen Verlauf der Zeitreihen aber auch die mittlere Differenz. Die Zeitreihen der geschätzten Laufzeitverzögerung beider Verfahren haben ausgeprägte saisonale Variationen, die auf einen höheren Gehalt an Wasserdampf in der Atmosphäre in den Sommermonaten zurückzuführen sind. Die Variationen sind für beide Verfahren annähernd gleich und verschwinden nach der Differenzbildung und der Reduktion um die Modellwerte fast völlig. Es fällt auf, dass die Zeitreihen der Station Algonquin Park in den Sommermonaten ein deutlich stärkeres Rauschen zeigen als in den Wintermonaten. Der Grund ist die verstärkte Variabilität der Atmosphäre in den Sommermonaten. Für Ny Ålesund ist sowohl das saisonale Verhalten als auch die Variabilität des Rauschens weniger stark ausgeprägt als für die Station Algonquin Park. Da die Variation der Atmosphäre in hohen Breiten deutlich geringer ist als in mittleren Breiten (KLOSE 2008), ist Ny Ålesund, das sich auf 78.9° nördlicher Breite befindet, einer weniger starken kurzzeitigen atmosphärischen Variabilität ausgesetzt als Algonquin Park auf 45.9° nördlicher Breite. Die Übereinstimmung der troposphärischen Gradienten ist für die Station Ny Ålesund besonders gut. Eine bessere Übereinstimmung wird für keine der übrigen Stationen erreicht. Für Algonquin Park dagegen ist die mittlere Differenz zwischen den Nord-Süd-Gradienten signifikant, doch auch hier sind Ähnlichkeiten im Verlauf der Zeitreihen erkennbar.

Die Abbildung 5.32 zeigt die mittleren Differenzen zwischen den geschätzten troposphärischen Laufzeitverzögerungen und troposphärischen Gradienten für alle Ko-lokationsstationen. Die angegebenen Standardabweichungen entsprechen nicht denen, die aus der Auswertung der Raumbesichtungsverfahren erhalten werden, da diese als überschätzt angesehen werden müssen. Weil die Zeitreihen der Differenzwerte abgesehen von einer mittleren Differenz keine signifikanten systematischen Anteile zeigen, wird eine realistische Standardabweichungen aus der Streuung dieser Zeitreihen berechnet.

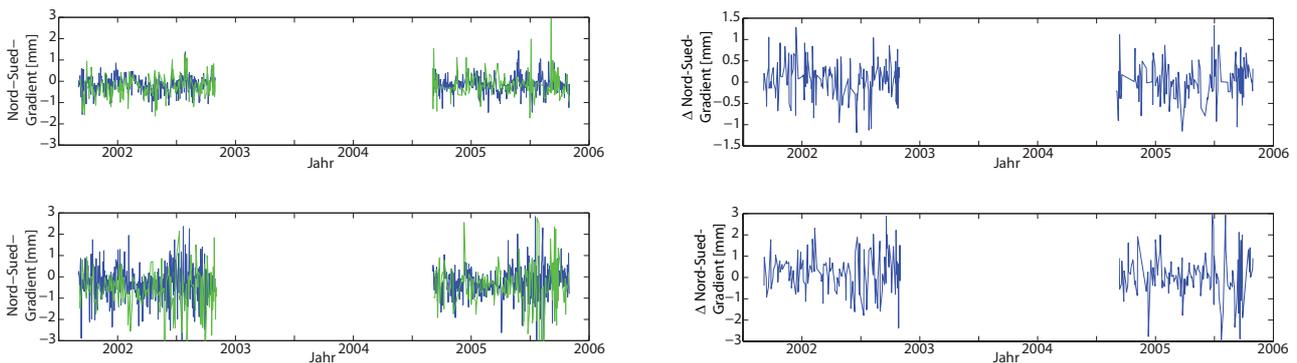
Etwa drei Viertel der mittleren Differenzen zwischen den geschätzten Laufzeitverzögerungen und ein Drittel der Differenzen zwischen den Gradienten sind signifikant. Die Ursache der Differenzen kann nicht eindeutig ermittelt werden. Es wurde geprüft, ob eine generelle Abhängigkeit der Differenzen von

- der geographischen Breite der Station,
- der ellipsoidischen Stationshöhe,
- dem Höhenunterschied von GPS- und VLBI-Station,
- der horizontalen Distanz zwischen GPS- und VLBI-Station,
- der Größe des geschätzten Troposphärenparameters,
- der Verwendung eines Radoms oder
- dem Radomtyp

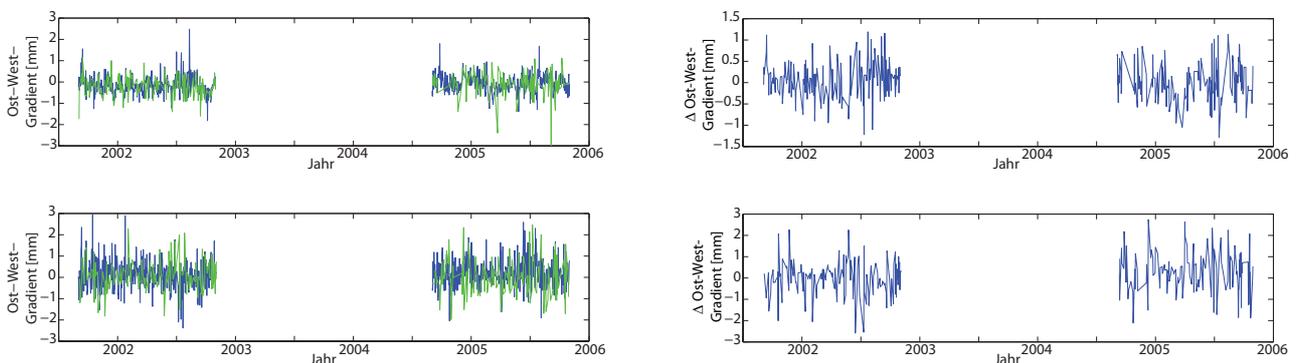
besteht. Es konnte jedoch kein allgemeingültiger funktionaler Zusammenhang gefunden werden. Jedoch kann für einige Stationen mit großen Differenzen ein Zusammenhang mit einem der genannten Aspekte vermutet werden, da die Stationen entweder einen besonders großen Höhenunterschied Δh zwischen GPS und VLBI aufweisen, die Station sich in großer Höhe befindet oder der geschätzte Anteil der Laufzeitverzögerung (hier kurz als ZPD



(a) Links: Troposphärische Laufzeitverzögerung aus GPS (blau) und VLBI (grün) für Ny Ålesund (oben) und Algonquin Park (unten). Rechts: Differenzen der troposphärische Laufzeitverzögerung (GPS-VLBI).



(b) Troposphärischer Nord-Süd-Gradient aus GPS (blau) und VLBI (grün) für Ny Ålesund (oben) und Algonquin Park (unten). Rechts: Differenz des troposphärischen Nord-Süd-Gradienten (GPS-VLBI).



(c) Troposphärischer Ost-West-Gradient aus GPS (blau) und VLBI (grün) für Ny Ålesund (oben) und Algonquin Park (unten). Rechts: Differenz des troposphärischen Ost-West-Gradienten (GPS-VLBI).

Abbildung 5.31: Aus GPS und VLBI geschätzte Troposphärenparameter sowie deren Differenzen für die Stationen Ny Ålesund und Algonquin Park. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen.

bezeichnet) sehr groß ist. Die Stationen sowie die möglichen Ursachen für die großen Differenzen sind in Tabelle 5.20 angegeben. Es muss davon ausgegangen werden, dass die gewählte Modellierung Unzulänglichkeiten aufweist, die besonders bei Stationen in extremen Höhen (Pie Town und Mauna Kea) mit sehr hoher Luftfeuchtigkeit oder mit großen Höhenunterschieden (Fort Davis) zu Fehlern in den ΔZWD führt. So ist es denkbar, dass die Formeln 5.6 und 5.7 für die Beschreibung der Abhängigkeit der Lufttemperatur und des Dampfdrucks von der Stationshöhe für große Höhenunterschiede zu ungenau sind. Die Stationen Fortaleza und Saint Croix fallen durch den besonders hohen Schätzwert auf. Allerdings ist das Vorzeichen der Differenz unterschiedlich, und es kann keine konkrete Vermutung für Modellunzulänglichkeiten formuliert werden.

HEINKELMANN *et al.* (2007) vergleichen geschätzte troposphärische Laufzeitverzögerungen, die von IVS und IGS bereitgestellt werden. Sie erhalten dabei eine mittlere Differenz von 6.6 mm und eine Streuung von etwa 8 mm. Die hier erhaltenen Differenzen weisen hingegen einen Mittelwert von nur 0.4 mm und eine Streuung von 1.8 mm auf. Die sehr kleine Differenz konnte durch die Verwendung von absoluten Phasenzentrumskorrekturen erhalten werden. Für die von HEINKELMANN *et al.* (2007) durchgeführten Vergleiche standen hingegen IGS-

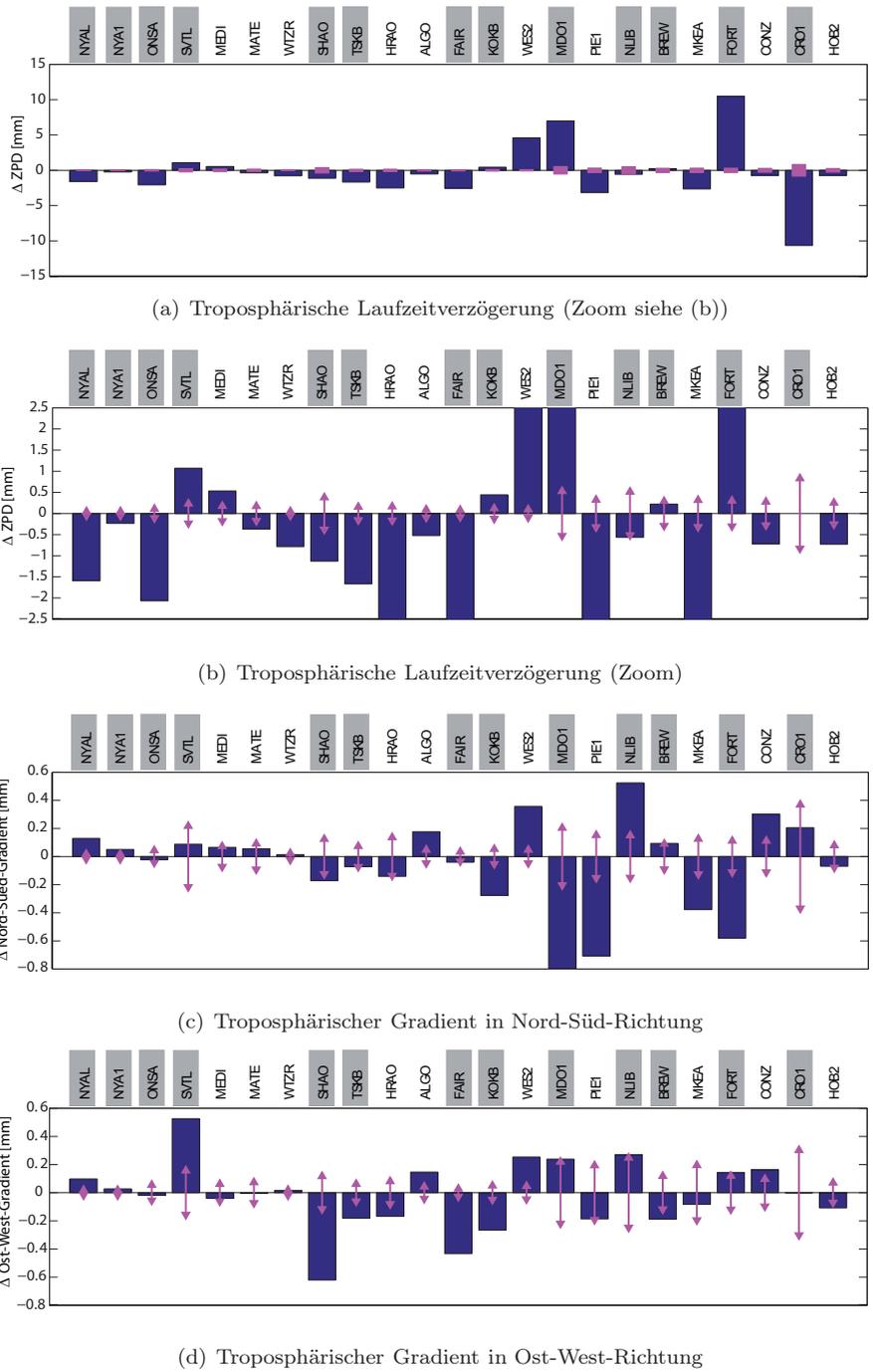


Abbildung 5.32: Differenzen zwischen Troposphärenparametern der GPS- und VLBI-Stationen auf Ko-lokationsstationen. Die Pfeile geben die aus der Streuung der Differenzzeitreihen berechnete (zweifache) Standardabweichung an (in der ersten Abbildung zur besseren Erkennbarkeit als Balken dargestellt). Die Stationen sind mit dem Namen der jeweiligen GPS-Station bezeichnet. Die Namen der Stationen auf denen die GPS-Antenne mit einem Radom betrieben wurde, sind grau unterlegt.

Lösungen zur Verfügung, die unter Verwendung relativer Phasenzentrumskorrekturen berechnet wurden. Für die verschiedenen IVS Analysezentren geben HEINKELMANN *et al.* (2007) eine mittlere Differenz der troposphärischen Laufzeitverzögerung von etwa 0.8 mm an. Damit liegt die in dieser Arbeit erreichte Übereinstimmung von GPS und VLBI über der der verschiedenen VLBI-Lösungen des IVS. Ein Grund dafür ist sicherlich die detaillierte Anpassung der Modelle in den hier verwendeten Softwarepaketen.

Tabelle 5.20: Mögliche Ursachen großer Differenzen zwischen der troposphärischen Laufzeitverzögerung und den troposphärischen Gradienten. Für die übrigen, in der Tabelle nicht enthaltenen Stationen ist der maximale Höhenunterschied $\Delta h \approx 24$ m, die maximale ellipsoidische Höhe $h \approx 1600$ m und der maximale geschätzte ZPD ≈ 180 mm.

Station	GPS-, VLBI-Station	Δ ZPD [mm]	Δ N-S-Gradient [mm]	Δ O-W-Gradient [mm]	Besonderheit der Station
Fort Davis	MD01 7613	7.0 ± 0.53	-0.799 ± 0.2036	0.238 ± 0.2192	$\Delta h \approx 398$ m, horizontale Entfernung \approx 8400 m
Pietown	PIE1 7234	-3.2 ± 0.32	-0.708 ± 0.1522	-0.186 ± 0.1935	$h \approx 2300$ m
Mauna Kea	MKEA 7617	-2.6 ± 0.32	-0.378 ± 0.1254	-0.083 ± 0.1951	$h \approx 3700$ m
Fortaleza	FORT 7297	10.5 ± 0.30	-0.580 ± 0.1117	0.144 ± 0.1191	geschätzter ZPD ≈ 250 mm
Saint Croix	CR01 7615	-10.7 ± 0.83	0.206 ± 0.3690	-0.001 ± 0.3022	geschätzter ZPD ≈ 240 mm

5.4.2 Kombination der Troposphärenparameter

Die Kombination der Troposphärenparameter zusätzlich zu Stationskoordinaten und EOP hat insbesondere für tägliche Kombinationslösungen aus folgenden Gründen ein hohes Potential:

- Es ist bekannt, dass Stationskoordinaten und Troposphärenparameter, die aus wenigen Beobachtungen (etwa über einen Tag) geschätzt werden, hoch korreliert sind. Das trifft insbesondere für die Laufzeitverzögerung und die Stationshöhen zu. Die Korrelationen liegen sowohl bei GPS- wie auch bei VLBI-Stationen im Mittel bei etwa -0.5. Für isoliert liegende Stationen werden teilweise auch Werte von bis zu -0.7 erreicht. Eine Kombination der Laufzeitverzögerung wirkt durch die hohe Korrelation in ähnlicher Weise, wie die Einführung der Höhenkomponente des terrestrischen Differenzvektors.
- Insbesondere für Ko-lokationsstationen, für welche kein terrestrisch bestimmter Differenzvektor vorliegt, beziehungsweise dieser wegen zu großer Diskrepanzen zu den Raumberechnungsverfahren in der Kombination nicht verwendet werden kann, wirkt eine Kombination der Laufzeitverzögerung vergleichbar wie die Einführung der Höhenkomponente des terrestrischen Differenzvektors. Das ist umso bedeutender, da für die Kombination täglicher GPS- und VLBI-Lösungen oftmals nur wenige Ko-lokationsstationen zur Verfügung stehen.
- Die Kombination der Gradienten kann zu einer Stabilisierung der Lagekomponenten der Stationspositionen und für schwach bestimmte Stationen auch zu einer Stabilisierung der Höhenkomponente führen.

Hinzu kommt, dass der Unterschied der geschätzten Laufzeitverzögerungen mit einer Genauigkeit von etwa 0.2 mm aus dem Modell berechnet werden kann, wenn der Höhenunterschied zwischen den Ko-lokationsstationen auf nur 1 m genau bekannt ist.

Für die Berechnung eines zeitabhängigen TRF ist die Kombination der Troposphärenparameter weniger von Bedeutung als für die tägliche Kombination, da für ersteren die Korrelationen zwischen Troposphärenparametern und den aus dem gesamten Zeitraum geschätzten Stationspositionen sehr viel kleiner sind. Auch sind für die Berechnung eines zeitabhängigen Referenzrahmens sehr viel mehr gute Ko-lokationsstationen verfügbar. Deshalb wird die Kombination der Troposphärenparameter nur am Beispiel der Tageslösungen demonstriert.

Die in Abbildung 5.32 gezeigten mittleren Diskrepanzen zwischen den aus GPS und VLBI geschätzten Troposphärenparametern sind zu einem nicht unerheblichen Teil signifikant. Um die Wirkung der Kombination zu untersuchen, werden dennoch fast alle Troposphärenparameter kombiniert. Ausgenommen sind solche, die sehr große signifikante Diskrepanzen aufweisen. Diese sind in Tabelle 5.21 zusammengefasst.

Die Kombination der troposphärischen Laufzeitverzögerung erfolgt, indem die modellierten Differenzen (beispielhaft für Ny Ålesund und Algonquin Park in Abbildung 5.29 dargestellt) in Form von Pseudobeobachtungen in die Ausgleichung eingeführt werden. Als Maß für die Wirkung der Kombination der Troposphärenparameter auf die täglichen Lösungen werden die täglichen Wiederholbarkeiten der Stationspositionen herangezogen. Um die Stabilisierung der einzelnen Tageslösung besser erkennbar zu machen, werden die Wiederholbarkeiten ohne

Tabelle 5.21: Ko-lokationen mit großen Diskrepanzen zwischen den aus GPS und VLBI geschätzten Troposphärenparametern. Die betreffenden Parameter werden nicht kombiniert.

Station	GPS-, VLBI-Station	Parameter, die nicht kombiniert werden
Fairbanks	FAIR 7225	Ost-West-Gradient
Kokee Park	KOKB 7298	Gradienten
Westford	WES2 7209	ZPD und Gradienten
Fort Davis	MD01 7613	ZPD
Pie Town	PIE1 7234	ZPD
Fortaleza	FORT 7297	ZPD
Saint Croix	CR01 7615	ZPD

Berücksichtigung der Standardabweichungen berechnet. Abbildung 5.33 zeigt die Änderung der Wiederholbarkeiten der VLBI-Stationspositionen gegenüber einer Referenzlösung, die ohne Kombination der Troposphärenparameter berechnet wurde (vergl. Kapitel 5.3.2.1). Ein positiver Wert entspricht dabei einer Verringerung, ein negativer Wert einem Anwachsen der Wiederholbarkeit durch die Kombination. Die Wiederholbarkeiten der GPS-Stationen erfahren nur eine minimale Änderung und werden deshalb nicht dargestellt. Zunächst erfolgt nur die Kombination der Laufzeitverzögerung. Die aus dieser Lösung erhaltenen Wiederholbarkeiten sind in der Abbildung 5.33 grün dargestellt. Da die Auswirkung dieser Kombination auf die Lagekomponenten der Stationen sehr klein ist, werden die Ergebnisse nur für die Stationshöhen gezeigt. Anschließend wird eine Lösung berechnet, für die sowohl die Laufzeitverzögerung als auch die Gradienten kombiniert werden. Die entsprechenden Wiederholbarkeiten für die Stationskoordinaten sind blau dargestellt.

Die Stationen, die positiv von der Kombination der Laufzeitverzögerung beeinflusst werden, sind Shanghai, Hartebeesthoek, Hobart und Kokee Park. Für die ersten drei gilt, dass sie im VLBI-Stationsnetz isoliert sind (siehe Abbildung 5.1) und deshalb im Vergleich zu anderen Stationen eine schlechteren Beobachtungsgeometrie aufweisen. Hinzu kommt, dass diese Stationen nicht regelmäßig und in sehr unterschiedlichen Stationsnetzen beobachten. Aufgrund dessen sind die Positionen dieser Stationen im Vergleich weniger gut bestimmt. Dies wird auch anhand der in Abbildung 5.26 gezeigten Wiederholbarkeiten deutlich. Negativ wirkt sich die Kombination auf die Station Matera aus.

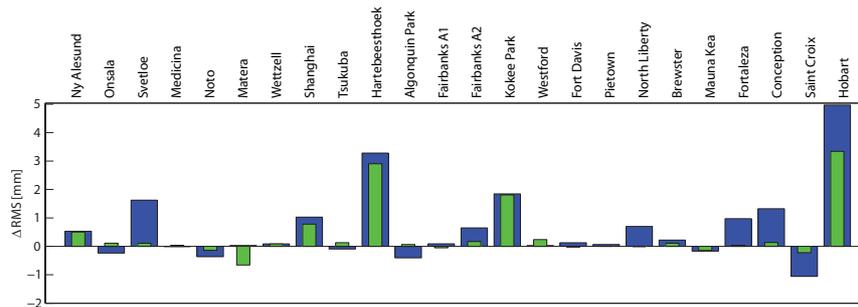
Die Kombination der Gradienten bewirkt insbesondere für Stationen mit wenig Beobachtungen (Svetloe) und Stationen in der südlichen Hemisphäre (Fortaleza, Conception, Hobart) eine weitere Stabilisierung der im Vergleich zu den Lagekomponenten schwächer bestimmten Höhenkomponente. Nachteilig wirkt sich die Kombination der Gradienten auf Saint Croix und in geringem Maße auf Algonquin Park aus. Die Wiederholbarkeiten der Lagekomponenten erfahren im Vergleich zur Höhe nur geringe Änderungen. Während die Nordkomponenten der Mehrzahl der Stationen von der Kombination geringfügig profitieren, sind positive und negative Auswirkungen auf die Ostkomponente nahezu gleich häufig vertreten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Kombination der Troposphärenparameter insbesondere zu einer Stabilisierung der Höhenkomponenten isoliert liegender Stationen führt. Die Lagekomponenten werden hingegen nur minimal beeinflusst. Die erwartete Verbesserung der Wiederholbarkeiten insbesondere für Ko-lokationsstationen, für die kein terrestrischer Differenzvektor gemessen wurde, konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die Station Svetloe, für die kein Differenzvektor verfügbar ist, profitiert als einzige der europäischen Stationen deutlich von der Kombination. Die Wiederholbarkeiten der Station Brewster hingegen ändern sich durch die Kombination nicht. Diese Station gehört jedoch zum VLBA-Netz und weist deshalb, wie in Kapitel 5.3.1.2 gezeigt, eine sehr hohe Genauigkeit auf, so dass sich möglicherweise deshalb die Kombination der Troposphärenparameter nicht stabilisierend auswirken kann.

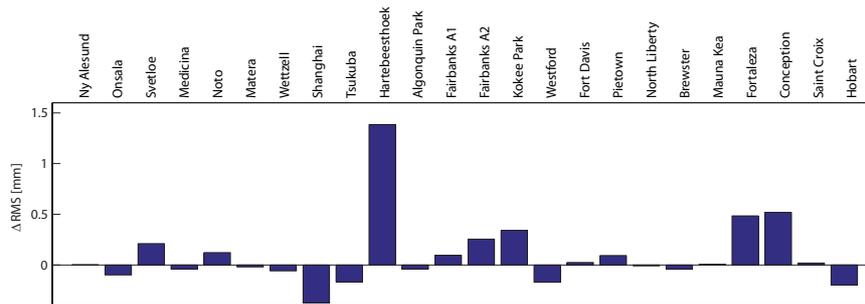
5.4.3 Validierung terrestrischer Differenzvektoren mit Hilfe von Troposphärenparametern

Troposphärenparameter können im Kombinationsprozess als Indikatoren für Diskrepanzen zwischen den terrestrischen Differenzvektoren und den Raumberechnungsverfahren dienen. Das wird im Folgenden anhand des homogenen Datensatzes der CONT05-Kampagne gezeigt.

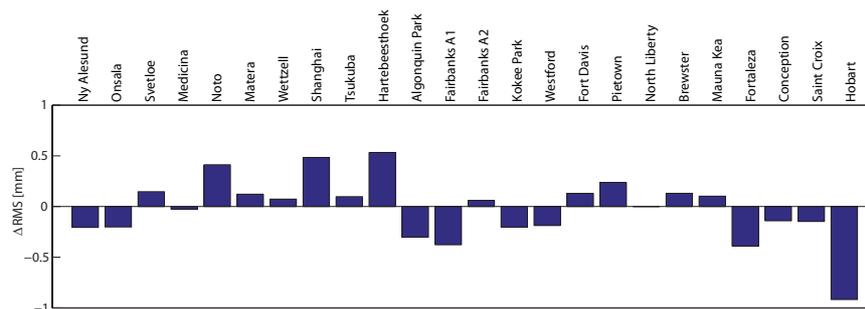
In Tabelle 5.22 sind zunächst die Diskrepanzen angegeben, die zwischen den terrestrischen Differenzvektoren und den aus den Raumberechnungsverfahren bestimmten Positionsdifferenzen für die CONT05-Kampagne



(a) Höhenkomponente



(b) Nordkomponente



(c) Ostkomponente

Abbildung 5.33: Änderung der täglichen Wiederholbarkeiten der VLBI-Stationskoordinaten einer Lösung mit kombinierter Laufzeitverzögerung (grün) und mit kombinierter Laufzeitverzögerung und kombinierten Gradienten (blau) gegenüber einer Referenzlösung ohne kombinierte Troposphärenparameter. Die Wiederholbarkeiten werden ohne Berücksichtigung der Standardabweichungen berechnet. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen.

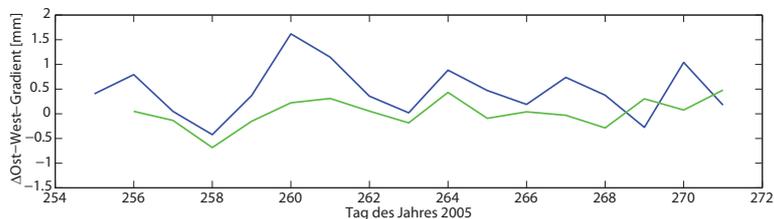
erhalten werden. Dabei fallen insbesondere die Stationen Hartbeesthoek und Westford auf, für die große Differenzen von mehr als 10 mm in einer der Lagekomponenten auftreten. Wird die entsprechende Komponente des terrestrischen Differenzvektors in der Kombination verwendet, führt dies zu einer Diskrepanz zwischen den korrespondierenden Gradienten von GPS und VLBI. Die Abbildung 5.34(a) zeigt einen Vergleich der Ost-West-Gradienten der Station Westford, die aus den individuellen GPS- und VLBI-Lösungen erhalten werden. Dabei ist nur eine kleine mittlere Differenz erkennbar. Nach der Kombination der Netze unter Verwendung aller Differenzvektoren weist das Gradientenpaar dagegen eine deutliche mittlere Differenz auf (Abbildung 5.34(b)). In einer zweiten Kombinationslösung werden wiederum alle Differenzvektoren eingeführt, jedoch die Ostkomponente der Station Westford nicht kombiniert. Ein erneuter Vergleich der Gradienten in Abbildung 5.34(c) zeigt, dass die Differenz nicht mehr vorhanden ist und die Gradienten nur minimale Unterschiede zu denen in Abbildung 5.34(a) aufweisen. Gleiches lässt sich auch für die Höhenkomponente der Station Westford nachweisen, für welche die größte Klaffung zwischen Differenzvektor und Raumberechnungsverfahren auftritt. Die bei einem Vergleich der individuellen Lösungen erhaltene Differenz von 5.9 mm in der troposphärischen Laufzeitverzögerung erreicht nach der Kombination einen Wert von nur noch 1.7 mm. Bleibt die Höhenkomponente von der Kombination ausgeschlossen, wird wieder ein Differenzwert von 5.9 mm erhalten. Ein Rückgang der Differenz durch die Kombination ist zwar wünschenswert, aber nicht, wenn, wie in diesem Fall, Diskrepanzen

in den Stationskoordinaten durch die geschätzten Laufzeitverzögerungen kompensiert werden. Diese Ergebnisse zeigen beispielhaft das Potential der Troposphärenparameter zum Nachweis von Diskrepanzen zwischen Raumbeobachtungsverfahren und terrestrischen Differenzvektoren. Sie können jedoch nur für die Validierung von Differenzvektoren zwischen Mikrowellenverfahren verwendet werden.

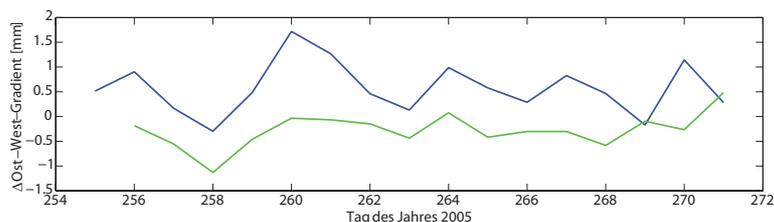
Tabelle 5.22: Differenzen zwischen den aus den Raumbeobachtungsverfahren berechneten und den terrestrisch gemessenen Differenzvektoren für die Beobachtungen der CONT05-Kampagne.

Station	GPS-, VLBI-Station	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
Ny Ålesund	NYAL ^R 7331	-0.95	4.60	0.19
	NYA1 ^R 7331	3.42	1.27	-8.82
Onsala	ONSA ^R 7213 ^R	-1.74	2.03	-11.59
Svetloe	SVTL ^R 7380	-	-	-
Wetzell	WTZR 7224	1.34	2.95	-1.03
Tsukuba	TSKB ^R 7345	-3.91	2.58	-9.07
Hartebeesthoek	HRAO 7232	-13.57	0.56	5.25
Algonquin Park	ALGO 7282	1.11	0.16	-4.83
Fairbanks	FAIR ^R 7225	0.40	-5.12	2.68
Kokee Park	KOKB ^R 7298	3.56	4.81	4.52
Westford	WES2 7209 ^R	-1.50	-14.18	-27.32

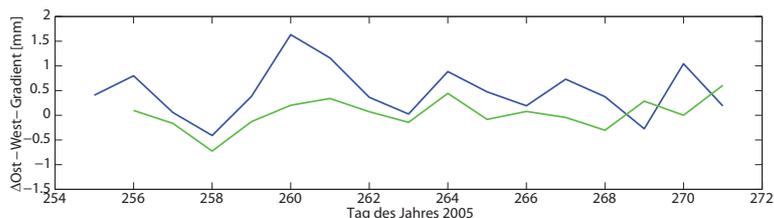
^R Die Antenne wurde mit einem Radom betrieben.



(a) Ohne Kombination der Stationspositionen



(b) Kombination der Stationspositionen unter Verwendung aller Komponenten der Differenzvektoren



(c) Kombination der Stationspositionen unter Verwendung aller Komponenten der Differenzvektoren ausgenommen der Ost-Komponente von Westford.

Abbildung 5.34: Troposphärischer Ost-West-Gradient der Station Westford bestimmt aus GPS (blau) und VLBI (grün).

5.4.4 Validierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung durch Beobachtungen von Wasserdampfradiometern

Aus den Messungen eines Wasserdampfradiometers (WVR) kann ebenso wie aus GPS- und VLBI-Beobachtungen der feuchte Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung als integraler Wert über die gesamte Atmosphärenschicht in Beobachtungsrichtung abgeleitet werden (vergl. Kapitel 3.1.2.1). Im Fall von GPS und VLBI wird die Laufzeitverzögerung von Mikrowellen direkt aus den Beobachtungen geschätzt. Das WVR misst dagegen die Stärke der Emission zweier Frequenzen durch die Atmosphäre (zum Beispiel der Frequenzen 21.0 und 31.4 GHz (GRADINARSKY *et al.* 1999)), die durch den Gehalt an Wasserdampf, ausfällbarem Wasser und Sauerstoff in der Atmosphäre bestimmt wird (ELGERED *et al.* 1991). Wasserdampf und ausfällbares Wasser emittieren jeweils verstärkt Mikrowellen unterschiedlicher Wellenlängen. Durch Messungen auf zwei Frequenzen können beide Anteile separiert werden. Mit Hilfe von Umrechnungskoeffizienten (engl.: *retrieval coefficients*) kann aus den Messungen der Wasserdampfgehalt in der jeweiligen Beobachtungsrichtung abgeleitet werden. Die Umrechnungskoeffizienten sind ortsabhängige Parameter, die mit Hilfe von Radiosondenmessungen bestimmt werden (ELGERED 1993).

Während der CONT05-Kampagne wurden auf einigen der Stationen WVR betrieben. Die Beobachtungen werden vom IVS unter <http://ivs.nict.go.jp/mirror/program/cont05> (22.10.2007) zur Verfügung gestellt. Der feuchte Anteil der Laufzeitverzögerung ist nur abhängig vom gemessenen Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Die Daten liegen bereits umgerechnet in die Laufzeitverzögerung in Beobachtungsrichtung vor. Für einen Vergleich mit GPS und VLBI müssen diese Werte in die Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung umgerechnet werden. Dafür wird die Übertragungsfunktion von NIELL (1996) für den feuchten Anteil der Laufzeitverzögerung, wie sie in Kapitel 3.1.2.1 beschrieben wurde, verwendet. Für den Vergleich mit den geodätischen Raumbeobachtungsverfahren wird jeweils ein ZWD-Wert zur vollen Stunde berechnet, indem die Beobachtungen der vorangegangenen und der nachfolgenden 30 Minuten gemittelt werden. Da keine Standardabweichungen für die Beobachtungen der WVR zur Verfügung stehen, werden die Standardabweichungen für die stündlichen Werte aus der Streuung der ZWD-Werte des jeweiligen Stundenintervalls berechnet.

Es wurde bereits erwähnt, dass die aus GPS- und VLBI-Beobachtungen geschätzten Laufzeitverzögerungen als Korrekturwerte zu einem konstanten Näherungswert bestimmt werden. Sie entsprechen deshalb nur näherungsweise dem feuchten Anteil der Laufzeitverzögerung, da sich Abweichungen des trockenen Anteils vom Näherungswert ebenfalls in diesen Parametern abbilden. Für einen Vergleich mit den WVR-Daten muss daher der „wahre“ feuchte Anteil aus den Schätzwerten berechnet werden. Dafür wird von der gesamten Laufzeitverzögerung, die sich als Summe von Näherungs- und Schätzwert ergibt, der mit Hilfe eines Modells und meteorologischen Beobachtungen berechnete „wahre“ trockene Anteil subtrahiert. Dieser ist abgesehen von der geographischen Breite ϕ und der ellipsoidischen Höhe h der Station nur vom Luftdruck abhängig. Meteorologische Beobachtungen liegen für alle VLBI-Stationen vor. Der Luftdruck in der Höhe h der GPS-Station kann mit Hilfe der Gleichung von BRUNNER und RÜEGER (1992) aus den Werten der jeweiligen VLBI-Station berechnet werden:

$$p(h) = p_0 - 0.03416 \frac{p_0}{T_0} (h - h_0). \quad (5.10)$$

Dabei ist h_0 die ellipsoidische Höhe der VLBI-Station in [m], für welche die Referenzwerte für die Temperatur T_0 in [K] und den Luftdruck p_0 in [mbar] bekannt sind. Die Berechnung des trockenen Anteils erfolgt mit dem Modell von Saastamoinen (Gleichung 3.13), wobei nur der Term zu Berechnung des trockenen Anteils berücksichtigt wird:

$$\Delta\rho_{dry} = \frac{0.0022768}{1 - 0.0026 \cos(2\phi) - 0.28 \cdot 10^{-6}h} \cdot p. \quad (5.11)$$

Der feuchte Anteil der Laufzeitverzögerung wird nun durch Reduzieren der gesamten Laufzeitverzögerung um den berechneten trockenen Anteil erhalten. Anschließend liegen ZWD-Werte für GPS, VLBI und das WVR vor. Da sich diese Werte auf die jeweilige Stationshöhe beziehen, müssen sie noch um den Effekt des Höhenunterschieds korrigiert werden. Dafür werden alle ZWD-Werte unter Verwendung der Gleichung 5.9 auf eine gemeinsame Höhe (hier wird die Höhe der GPS-Station gewählt) umgerechnet. Die Höhenunterschiede zwischen den Instrumenten sind in Tabelle 17 im Anhang angegeben.

Wasserdampfradiometer wurden während der CONT05-Kampagne kontinuierlich auf den Ko-lokationsstationen Wettzell, Algonquin Park und Kokee Park betrieben (<http://ivs.nict.go.jp/mirror/program/cont05/#WVR>, 14.02.2008). Abbildung 5.35 zeigt exemplarisch die ZWD-Zeitreihen bestimmt aus GPS-, VLBI und WVR-Beobachtungen für die Station Wettzell.

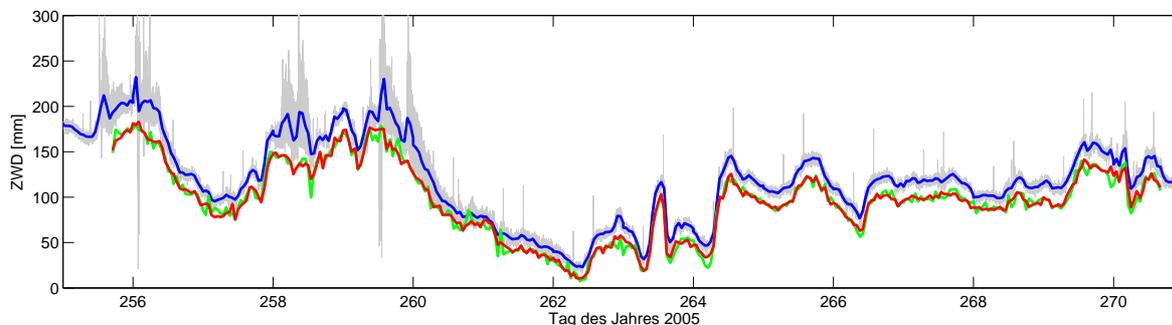


Abbildung 5.35: Stündliche ZWD-Werte für die Station Wettzell geschätzt aus GPS- und VLBI-Beobachtungen (rot und grün) und berechnet aus WVR-Beobachtungen (blau). Die ZWD-Werte des WVR zu den ursprünglichen Beobachtungsepochen (grau) sind ebenfalls dargestellt.

Die WVR-Werte des Wasserdampfradiometers zeigen für die Tage 261 bis 270 im zeitlichen Verlauf eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den aus GPS und VLBI bestimmten Werten, weisen jedoch einen signifikanten Versatz zu diesen auf. Für die Tage 255 bis 260 fällt auf, dass die WVR-Werte teilweise sehr stark streuen und die stündlichen Werte im zeitlichen Verlauf von den GPS- und VLBI-Zeitserien abweichen. Es muss angenommen werden, dass sich zu diesen Epochen Regen- oder Kondenswasser auf den optischen Elementen der Instrumente befunden hat, was zu großen Verfälschungen der Beobachtungen führt (ELGERED *et al.* 1991). Zwar messen Wasserdampfradiometer auch den Gehalt flüssigen Wassers in der Atmosphäre, die Genauigkeit dieser Werte reicht jedoch nicht aus, um die verfälschten ZWD-Werte zu korrigieren. Die fehlerbehafteten Daten müssen also für einen Vergleich eliminiert werden. Da keine Informationen über Regenepochen vorliegen, wird das erhöhte Rauschen der Beobachtungen als Indikator verwendet.

In der Tabelle 5.23 sind die mittleren Differenzen zwischen den GPS-, VLBI- und den stündlichen WVR-Werten sowie die gewichteten Streuungen der Differenzzeitreihen für die drei Stationen Wettzell, Algonquin Park und Kokee Park angegeben. Für alle drei Stationen weisen die WVR-Werte große mittlere Differenzen zu den aus GPS und VLBI bestimmten ZWD auf, während zwischen GPS und VLBI nur ein sehr kleiner Versatz auftritt. Die Ursache für die großen Differenzen ist bislang nicht bekannt. Fehler bei der Berechnung des Wasserdampfgehalts aus WVR-Messungen können jedoch durch das Modell, das der Separation der Anteile von flüssigem Wasser und Wasserdampf dient und durch Kalibrationsprobleme entstehen. Zudem ist die Genauigkeit der Umrechnungskoeffizienten und damit die des aus den WVR-Messungen bestimmten Wasserdampfgehalts durch mögliche Fehler in den Radiosondenmessungen limitiert (ELGERED *et al.* 1991).

Die Streuungen der Differenzen spiegeln die Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs der Zeitreihen wider. Für alle Vergleiche auf einer Station haben die Streuungen dieselbe Größenordnung. Das bedeutet, dass die verschiedenen Messverfahren die zeitliche Variabilität der troposphärischen Laufzeitverzögerung etwa mit gleicher Genauigkeit erfassen. Die Streuung der Differenzzeitreihen GPS-WVR sind jedoch für alle Stationen etwas kleiner als die der Differenzzeitreihen GPS-VLBI und VLBI-WVR. Das Ergebnis zeigt, dass die aus VLBI bestimmten feuchten Anteile der Laufzeitverzögerung ein geringfügig stärkeres Rauschen aufweisen als die aus GPS und dem WVR bestimmten Werte. Ähnliche gute Übereinstimmungen werden für Wettzell von POTTIAUX und WARNANT (2002) und für Westford von NIELL *et al.* (2001) erhalten. Vergleiche anderer Autoren (zum Beispiel SNAJDROVA *et al.* (2005)) hatten dagegen ergeben, dass die zeitliche Variation der aus WVR-Beobachtungen bestimmten ZWD deutlich stärker von der Variation der aus GPS und VLBI bestimmten ZWD abweicht.

Die Ergebnisse in Tabelle 5.23 zeigen, dass eine Validierung des aus GPS und VLBI bestimmten ZWD durch WVR-Messungen möglich ist. Allerdings muss die Validierung auf den zeitlichen Verlauf beschränkt bleiben, da die aus WVR bestimmten Werte große mittlere Differenzen zu GPS und VLBI aufweisen. Außerdem können WVR-Beobachtungen, die durch Niederschlag verfälscht sind, nicht für einen Vergleich verwendet werden.

Tabelle 5.23: Mittlere Differenzen zwischen ZWD-Werten aus GPS, VLBI und WVR sowie die (gewichtete) Streuung der Differenzzeitreihen.

Station / Messverfahren	GPS-, VLBI-Station	mittlere gewichtete Differenz [mm]	gewichtete Streuung [mm]
Wettzell			
WVR - GPS	WTZR	16.9±0.3	4.5
WVR - VLBI	7224	17.6±0.3	5.5
GPS - VLBI	WTZR 7224	0.6±0.3	5.1
Algonquin Park			
WVR - GPS	ALGO	27.3±0.4	7.0
WVR - VLBI	7282	27.1±0.5	9.2
GPS - VLBI	ALGO 7282	-0.7±0.4	8.0
Kokee Park			
WVR - GPS	KOKB	5.2±0.3	4.9
WVR - VLBI	7298	4.6±0.4	8.1
GPS - VLBI	KOKB 7298	-0.3±0.4	7.7

5.5 Vergleich des zeitabhängigen und des zeitunabhängigen Referenzrahmens

Die Realisierung eines zeitabhängigen und eines zeitunabhängigen Referenzrahmens wurde in den vorangegangenen Kapiteln (5.2 und 5.3) am Beispiel homogen prozessierter Beobachtungsdaten demonstriert. Ein Vergleich der beiden Referenzrahmen ist unter verschiedenen Gesichtspunkten möglich. Die im Rahmen dieser Arbeit interessanten Fragestellungen erfordern einen Vergleich hinsichtlich des Gültigkeitsbereichs, der Genauigkeit, der Homogenität, des Parameterraums sowie der Verfügbarkeit der Parameter.

Eine Gegenüberstellung der beiden Referenzrahmen hinsichtlich der Anforderungen und der Konzeption erfolgte einführend in Kapitel 4.3. Während der zeitabhängige Referenzrahmen mittlere Stationspositionen und -geschwindigkeiten über einen langen Zeitraum angibt, beschreibt der Epochenreferenzrahmen die tatsächliche Geometrie des Stationsnetzes zu einer bestimmten Epoche. Der Epochenreferenzrahmen stellt somit eine „Momentaufnahme“ dar und ist deshalb nur zu dieser Epoche gültig. Für die Anwendung des Epochenreferenzrahmens bedeutet das, dass zu jeder Epoche (für jeden Tag) ein anderer Epochen-Referenzrahmen gewählt werden muss. Der zeitabhängige Referenzrahmen ermöglicht, da er die Stationsbewegungen enthält, die Berechnung eines mittleren Stationsnetzes zu jeder beliebigen Epoche. Mit zunehmendem zeitlichen Abstand von der Referenzepoche nimmt aber die Genauigkeit der Stationspositionen wegen der beschränkten Genauigkeit der Stationsgeschwindigkeiten ab. Je nach Genauigkeitsanforderung ist die Anwendbarkeit des zeitabhängigen Referenzrahmens damit auch auf einen bestimmten Zeitraum beschränkt.

Beide Referenzrahmen unterscheiden sich bezüglich der geschätzten Parameter. Der zeitabhängige Referenzrahmen umfasst im Gegensatz zum zeitunabhängigen Referenzrahmen neben den Positionen der Stationen auch deren Geschwindigkeiten und liefert damit Information über die linearen Bewegungen der Stationen. Stationsbewegungen (sogar nicht-lineare) können aber auch direkt aus einer Zeitreihe von Epochenreferenzrahmen abgeleitet werden. Die zeitlich lineare Änderung der Nutationswinkel während eines Tages wird nur aus der Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens erhalten. Bei der Berechnung eines Epochenreferenzrahmens kann diese Änderung wegen der hohen Korrelationen mit den Polkoordinaten nicht geschätzt werden und wird als Null angenommen.

Hinsichtlich der rechnerischen Genauigkeit der Parameter unterscheiden sich die beiden Referenzrahmen auf Grund der unterschiedlichen Anzahl eingegangener Beobachtungen (siehe Tabelle 5.24) sehr stark. Der Unterschied im Genauigkeitsbereich lässt sich anhand der in den Tabellen 5.8 und 5.17 angegebenen mittleren Standardabweichungen der Stationspositionen, die aus den Stationskoordinatenzeitreihen erhalten werden, gut erkennen. Für die Stationspositionen ergibt sich zur Referenzepoche des zeitabhängigen Referenzrahmens ein Verhältnis der Standardabweichungen aus zeitabhängigem und zeitunabhängigem Referenzrahmen von etwa 1/30 für GPS- und 1/8 für VLBI-Stationen. Der Unterschied in den Genauigkeiten der geschätzten EOP wird durch einen Vergleich der Streuungen erkennbar, die in den Tabellen 5.15 und 5.18 angegeben sind. Dabei zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Polkoordinaten, die sowohl aus VLBI- als auch aus GPS-Beobachtungen geschätzt werden können und den Nutationsparametern und UT1-UTC, die nur aus VLBI-Beobachtungen absolut

bestimmt werden können. Das Verhältnis der Standardabweichungen, mit denen die Polkoordinaten konsistent zu einem zeitabhängigen beziehungsweise zeitunabhängigen Referenzrahmen geschätzt werden, beträgt etwa $1/6 - 1/7$. Für die Nutationsparameter und UT1-UTC ergibt sich dagegen kein signifikanter Genauigkeitsunterschied. Es muss jedoch bemerkt werden, dass diese Gegenüberstellung nur eingeschränkt möglich ist, da die zeitlichen Ableitungen der Nutationswinkel nur für die Berechnung des zeitabhängigen Referenzrahmens, nicht aber für die des zeitunabhängigen Referenzrahmens parametrisiert wurden.

Ein weiteres Merkmal der Referenzrahmen ist die Homogenität (oder Konsistenz) der Parameterzeitreihen. Da beide Referenzrahmen aus denselben, homogen über den gesamten Zeitraum prozessierten Eingangsdaten berechnet wurden, liegen keine Inkonsistenzen bezüglich der Prozessierung vor. Das geodätische Datum ist ebenfalls für beide Referenzrahmen gleich gewählt. Durch die variierende Netzgeometrie der zeitunabhängigen Referenzrahmen kann es jedoch zwischen diesen zu Unterschieden in der Genauigkeit der Lösung und in der Realisierung des geodätischen Datums kommen. Die Variation der aus den Epochenreferenzrahmen erhaltenen Zeitreihen für Stationskoordinaten und EOP enthält somit nicht nur die Variation der Parameter selbst, sondern auch Variationen, die sich aus der unterschiedlichen Genauigkeit der Lösungen ergeben, sowie kleine Variationen des geodätischen Datums. Letztere sind nicht notwendigerweise in den Standardabweichungen der Parameter repräsentiert. Ein direkter Nachweis des Einflusses der variierenden Genauigkeit der Lösungen und der Datumsunterschiede ist nicht möglich, da beide Effekte nicht getrennt werden können. Für die Homogenität innerhalb des kombinierten Netzes ist es entscheidend, wie gut die Stationsnetze durch die vorhandenen Ko-lokationen verknüpft sind. Durch die Änderung der Geometrie der Stationsnetze variiert auch die Anzahl der Ko-lokationen zwischen den einzelnen Epochenreferenzrahmen und damit die innere Konsistenz dieser Referenzrahmen stark. Da insbesondere das VLBI-Stationsnetz Variationen unterliegt, sind vor allem die Parameter sensitiv für die Qualität der Verknüpfung, die allein aus VLBI-Beobachtungen bestimmt werden (Nutationswinkel und UT1-UTC). In Kapitel 5.3 wurde der exponentielle Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ko-lokationen und der Genauigkeit der EOP am Beispiel einer Polkoordinate gezeigt.

Auch für die gemeinsam mit dem zeitabhängigen Referenzrahmen geschätzten EOP treten Inhomogenitäten in den Zeitreihen durch unterschiedliche Genauigkeiten auf. Die Parametrisierung des zeitabhängigen Referenzrahmens wurde so gewählt, dass innerhalb des Beobachtungszeitraums zu jeder 0-Uhr-Epoche alle EOP geschätzt werden. Da GPS- und SLR kontinuierlich beobachten, können die Polkoordinaten für jede 0-Uhr-Epoche mit etwa gleicher Genauigkeit bereitgestellt werden. Wegen der gewählten kontinuierlich stückweise stetigen Darstellung der EOP können aber auch die Nutationswinkel und UT1-UTC zu jeder 0-Uhr-Epoche berechnet werden. Ausgehend von jenen 0-Uhr-Epochen, an denen diese Parameter durch VLBI-Beobachtungen absolut bestimmt sind, ist es durch die aus GPS und SLR bestimmten ersten zeitlichen Ableitungen und die gewählte Parametrisierung möglich, die Nutationswinkel und UT1-UTC zu jeder weiteren 0-Uhr-Epoche zu berechnen. Die Parameter zu deren Bestimmung VLBI-Beobachtungen nicht direkt sondern nur indirekt über die ersten Ableitungen beigetragen haben, weisen eine geringere Genauigkeit auf als die direkt aus VLBI bestimmten Parameter. Die Streuungen (WRMS und RMS) der Parameterzeitreihen in Tabelle 5.15 zeigen aber, dass diese Genauigkeitsunterschiede durch die Standardabweichungen recht gut repräsentiert sind.

Der zeitabhängige und der zeitunabhängige Referenzrahmen unterscheiden sich auch hinsichtlich der Verfügbarkeit der Parameter. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, liegen die gemeinsam mit dem zeitabhängigen Referenzrahmen geschätzten EOP in kontinuierlichen Zeitreihen vor. Epochenreferenzrahmen werden nur dann berechnet, wenn VLBI-Beobachtungen vorliegen. Somit werden auch die korrespondierenden Nutationswinkel und UT1-UTC-Werte nur zu den entsprechenden 0-Uhr-Epochen berechnet, und es liegt keine kontinuierliche Zeitreihe für diese Parameter vor. Hinzu kommt, dass nicht jede der VLBI-Sessions zur Berechnung eines Epochenreferenzrahmens geeignet ist. Weist eine VLBI-Session weniger als drei geeignete Ko-lokationen mit GPS auf, so kann keine Kombinationslösung berechnet werden. Das heisst, dass bei der Berechnung von Epochenreferenzrahmen nicht alle zur Verfügung stehenden VLBI-Beobachtungen verwendet werden können. In Kapitel 5.3 wurde gezeigt, dass die Anzahl der Epochenreferenzrahmen, die berechnet werden können, stark von dem gewählten Grenzwert für die Auswahl der terrestrischen Differenzvektoren abhängt. Bei einem Grenzwert von 20 mm können etwa 13% der 326 Epochenreferenzrahmen nicht berechnet werden. Bei einem Grenzwert von 15 mm sind es mehr als 20%. Dies zeigt die starke Abhängigkeit der Epochenreferenzrahmen von der Konfiguration des VLBI-Netzes und damit von der Anzahl der verfügbaren Ko-lokationen. In die Realisierung des zeitabhängigen Referenzsystems gehen dagegen alle VLBI-Sessions ein, an denen wenigstens drei VLBI-Stationen beteiligt sind. Dabei ist es nicht entscheidend, ob diese Stationen Ko-lokationsstationen sind.

In der Tabelle 5.24 sind die Merkmale des zeitabhängigen und des zeitunabhängigen Referenzrahmens noch einmal gegenübergestellt. Während der zeitabhängige Referenzrahmen eine höhere Genauigkeit, Homogenität und Verfügbarkeit der Parameter aufweist, ist der zeitunabhängige Referenzrahmen geometrietreu. Es wäre daher wünschenswert einen Referenzrahmen zu schaffen, der alle genannten Vorteile aufweist. Naheliegender wäre,

den zeitabhängigen Referenzrahmen dahingehend zu verbessern, dass die wahre Geometrie des Stationsnetzes zu allen Epochen wiedergegeben werden kann. Für die Umsetzung sind zwei Ansätze denkbar: Die Modellierung der jahreszeitlichen Stationsbewegungen mittels geophysikalischer Modelle und die Schätzung jahreszeitlicher Signale der Stationsbewegungen.

Tabelle 5.24: Vergleich des zeitabhängigen und des zeitunabhängigen Referenzrahmens.

	zeitabhängiger Referenzrahmen	zeitunabhängiger Referenzrahmen
Gültigkeitsbereich	lang (Jahre)	kurz (wenige Tage)
Geometrietreue	niedrig	hoch
rechnerische Genauigkeit	hoch	niedrig
Konsistenz über einen langen Zeitraum bezügl. - Stationspositionen	ja	nein; bei Verwendung einer Zeitreihe von Epochenreferenzrahmen: ja, aber geringer als die des zeitabhängigen Referenzrahmens
- Polkoordinaten	ja	nein; bei Verwendung einer Zeitreihe von Epochenreferenzrahmen: ja, aber geringer als die des zeitabhängigen Referenzrahmens
- UT1-UTC und Nutationsparameter	nein	nein; bei Verwendung einer Zeitreihe von Epochenreferenzrahmen: ja
Parameter	Stationspositionen und -geschwindigkeiten), EOP und deren zeitlich lineare Änderung	Stationspositionen, EOP (zeitlich lineare Änderung für alle EOP außer Nutationswinkel)
Anzahl der Parameter	$\approx 5900^*$	≈ 500 pro Referenzrahmen ($500 \cdot 326 = 163000$ für alle Epochenreferenzrahmen)*
Verwendung aller verfügbaren Beobachtungen der Raumbeobachtungsverfahren	ja	nein

* Die Angaben beziehen sich auf die vorliegenden Referenzrahmen.

In Kapitel 5.3.2.3 wurde gezeigt, dass jahreszeitliche Stationsbewegungen, die insbesondere in den Stationshöhen auftreten, durch geophysikalische Auflastmodelle beschrieben werden können. Eine Berücksichtigung der Auflast sowohl bei der Berechnung wie auch bei der Anwendung des Referenzrahmens, würde die Geometrietreue des Referenzrahmens erhöhen. Jedoch wurde in Kapitel 5.3.2.3 auch deutlich, dass die bisher vorhandenen Modelle nicht die erforderliche Genauigkeit und Auflösung haben, um die Stationsbewegungen mit ausreichender Genauigkeit zu beschreiben. Möglicherweise bestehen aber auch seitens der Auswertung der Raumbeobachtungsverfahren Defizite, und es treten scheinbare Stationsbewegungen auf, die keine geophysikalische Ursache haben, sondern durch Unzulänglichkeiten in gewählten Reduktionsmodellen hervorgerufen werden. Diese Effekte werden nicht reduziert und verbleiben in den Beobachtungen. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, mittlere Jahres- und

Halbjahressignale der Stationsbewegungen zu schätzen. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Beschreibung eines Großteils der jahreszeitlichen Stationsbewegungen. Halbjahressignale haben zwar im Gegensatz zu jährlichen Signalen keine direkte geophysikalische Bedeutung, ermöglichen es aber, die Abweichung des jahreszeitlichen Signals von einem Sinussignal zu beschreiben. Die geschätzten jährlichen Variationen der Stationspositionen enthalten sowohl geophysikalisch bedingte Signale, als auch solche, die durch Unzulänglichkeiten in den verwendeten Modellen hervorgerufen werden. Letzteres Verfahren konnte wegen der Kürze des Datensatzes in dieser Arbeit nicht umgesetzt werden, wird aber von MEISEL *et al.* (2008) als aussichtsreich beurteilt. Bei diesem Ansatz wird ein mittleres Jahressignal je Station bestimmt, aber Abweichungen der jährlichen Stationsbewegungen vom mittleren Jahressignal werden nicht erfasst. Die Geometrietreue ist damit zwar verbessert jedoch nicht vollständig gegeben.

Die Berücksichtigung der Variation der Stationspositionen führt durch die erhöhte Geometrietreue auch zu einer verbesserten Realisierung des Massenzentrums der Erde sowie des Maßstabs (zum Beispiel RÜLKE *et al.* (2008)). Für die Realisierung eines hochgenauen zeitabhängigen Referenzrahmens ist daher die Berücksichtigung jahreszeitlicher Stationsbewegungen in Zukunft unabdingbar.

6. Zusammenfassung und Empfehlungen für zukünftige Arbeiten

Die Realisierung terrestrischer Referenzsysteme ist eine wichtige Aufgabe der Geodäsie und eine wesentliche Zielsetzung von GGOS. In dieser Arbeit wurden Methoden zur Berechnung eines zeitabhängigen und eines zeitunabhängigen Referenzrahmen entwickelt und die Umsetzung anhand von GPS-, VLBI- und SLR-Beobachtungen demonstriert. Wichtigste Zielsetzung bei der Erarbeitung der Methoden war es, eine höchstmögliche Genauigkeit und Konsistenz jedes einzelnen Referenzrahmens, aber auch Konsistenz zwischen den Referenzrahmen zu gewährleisten.

Für die Berechnung der Referenzrahmen wurden zeitlich hochaufgelöste Eingangsdaten verwendet, wie es seit der Berechnung des ITRF2005 innerhalb des IERS Standard ist. Neben den bei der Berechnung des ITRF berücksichtigten Parametern Stationskoordinaten, Polkoordinaten und UT1-UTC (sowie deren erste zeitliche Ableitungen) wurden in dieser Arbeit zusätzlich Nutationsparameter sowie Troposphärenparameter der Mikrowellenverfahren GPS und VLBI analysiert und kombiniert.

Der zeitabhängige und der zeitunabhängige Referenzrahmen unterscheiden sich wesentlich durch den betrachteten Zeitraum und die Anzahl der eingehenden Beobachtungen und daraus resultierend durch ihre Parametrisierung, ihren Informationsgehalt, ihren Gültigkeitsbereich und ihre Genauigkeit. Darüber hinaus ergeben sich individuelle Anforderungen an die Kombinationsmethodik infolge der unterschiedlichen Parametrisierung der Stationspositionen und der EOP sowie durch die unterschiedliche Anzahl zur Verfügung stehender Kollisionsstationen. Diesen Unterschieden wurde durch die individuell entwickelten Kombinationsmodelle Rechnung getragen.

Die wesentliche Voraussetzung für die Berechnung der hochgenauen und konsistenten Referenzrahmen sind homogen prozessierte Eingangsdaten der verschiedenen Raubeobachtungsverfahren. Im Rahmen der Vorbereitungen des Projekts GGOS-D, in welchem vier deutsche Institutionen zusammenarbeiteten, wurden die zur Auswertung der Beobachtung verwendeten Softwarepakete hinsichtlich der verwendeten Modelle und Parametrisierung angeglichen. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten wurden vom DGFI und vom GFZ zur Verfügung gestellt. Um eine höchstmögliche Genauigkeit der Referenzrahmen zu erhalten, kam vorbereitend der Analyse der Eingangsdaten, der Identifikation und Reduktion von Ausreißern sowie dem Aufdecken und Berücksichtigen von Unstetigkeiten in den Stationspositionszeitreihen große Bedeutung zu.

Die geodätischen Datumparameter *Lage des Massenzentrum der Erde* und *Maßstab* können unter Verwendung von Konventionen aus den Beobachtungen der Raubeobachtungsverfahren realisiert werden. Unterschiede zwischen den aus den einzelnen Raubeobachtungsverfahren realisierten Datumparametern führen, wenn sie unberücksichtigt bleiben, zu einer Limitierung von Genauigkeit und Konsistenz der Lösung. Die Analyse der Datumparameter ergab, dass zwischen der GPS- und SLR-Lösung möglicherweise ein signifikanter Unterschied im Netzmaßstab auftritt. Da dieser jedoch nicht gesichert nachgewiesen werden konnte, wurde der Maßstab der kombinierten Lösung dennoch aus allen drei Verfahren festgelegt. Der aus GPS bestimmte Koordinatenursprung weist signifikante periodische Änderungen auf, die sehr wahrscheinlich durch Unzulänglichkeiten in der Strahlungsdruckmodellierung hervorgerufen werden. Der Koordinatenursprung der kombinierten Lösung wurde daher nur aus SLR-Beobachtungen bestimmt.

Wichtiger Bestandteil der Kombinationsmodelle ist die Auswahl geeigneter terrestrischer Differenzvektoren für die Kombination der Stationspositionen. Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die Koordinaten des terrestrischen Rotationspols zur Beurteilung der Konsistenz der kombinierten Lösung herangezogen werden. Als Kriterium für die Auswahl eines Satzes an Differenzvektoren wurde eine möglichst hohe Konsistenz gefordert. Um die hohe Genauigkeit der einzelnen Beobachtungsverfahren in der kombinierten Lösung nicht zu verschlechtern, wurde eine zweite Forderung formuliert: Die Deformation der Stationskoordinatennetze durch die Kombination soll minimal sein. Es wurde gezeigt, dass ein Satz an Differenzvektoren gefunden werden kann, der diese Forderungen erfüllt. Dabei fällt auf, dass insbesondere für die Kombination von GPS und VLBI nur wenige Differenzvektoren ausgewählt werden: neun von insgesamt 19 Differenzvektoren.

Dass nur wenige Differenzvektoren verwendet werden können, wenn eine hohe Konsistenz und Genauigkeit des Referenzrahmens erreicht werden soll, ist auf die teilweise großen Diskrepanzen zwischen den terrestrisch bestimmten und den aus den Raubeobachtungsverfahren abgeleiteten Differenzvektoren zurückzuführen. Wegen der Vielzahl der möglichen Ursachen ist es kaum möglich, die Diskrepanzen im einzelnen Fall zu erklären. Es konnte aber gezeigt werden, dass der sogenannte *blue sky effekt* bei SLR zu Differenzen in der Höhenkomponente von bis zu 1.4 mm führt. Unter dem Anspruch, ein terrestrisches Referenzsystem mit Millimetergenauigkeit zu realisieren, muss dieser Effekt berücksichtigt werden. Die Diskrepanzen, die teilweise Zentimeterbeträge erreichen, können jedoch dadurch nur minimal verringert werden. Es muss vermutet werden, dass beispielsweise

Fehler in der Orientierung der Differenzvektoren und Fehler in der Bestimmung der Referenzpunkte der Teleskope Hauptursache für die großen Diskrepanzen sind.

Eine Möglichkeit die Konsistenz zwischen dem zeitabhängigen und den zeitunabhängigen Referenzrahmen zu erhöhen, besteht darin, in die Berechnung der zeitunabhängigen Referenzrahmen nicht die gemessenen, sondern die aus dem zeitabhängigen Referenzrahmen berechneten Differenzvektoren einzuführen. Es wurde gezeigt, dass die Konsistenz dadurch erheblich gesteigert werden kann. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass mehr zeitunabhängige Referenzrahmen (mit den erforderlichen drei oder mehr Differenzvektoren) berechnet werden können, da für alle Ko-lokationsstationen berechnete Differenzvektoren mit hoher Genauigkeit vorliegen.

Das Potential der Kombination verschiedener Beobachtungsverfahren für die Berechnung eines TRF wird aus dieser Arbeit sehr deutlich. Jedes der Beobachtungsverfahren trägt einzigartig zum Referenzrahmen bei: So wird der Koordinatenursprung allein aus SLR bestimmt, und VLBI ist das einzige Beobachtungsverfahren, das den Bezug zum raumfesten Referenzrahmen gewährleistet. Weiterhin wurde deutlich, dass GPS durch sein dichtes, globales Stationsnetz und die damit verbundene hohe Anzahl an Ko-lokationen mit den Stationen der anderen Beobachtungsverfahren eine zuverlässige Kombination aller Verfahren überhaupt erst möglich macht. Vergleiche der individuellen Lösungen der Raumberechnungsverfahren mit den kombinierten Lösungen ergaben sowohl für den zeitabhängigen als auch den zeitunabhängigen Referenzrahmen, dass eine Genauigkeitssteigerung durch die Kombination erreicht wird. Die Verbesserung der Genauigkeit der Polkoordinaten beträgt bei Berechnung eines zeitabhängigen Referenzrahmens etwa 10% im Vergleich zur GPS-, bis zu 30% im Vergleich zur VLBI- und bis zu 60% im Vergleich zur SLR-Lösung. Im Falle der Epochenreferenzrahmen nehmen die Genauigkeiten der Polkoordinaten um 10-30% im Vergleich zu den verfahrensspezifischen Lösungen zu. Wenn auch der WRMS der kombinierten Nutations- und UT1-UTC-Zeitreihen teilweise etwas größer ist als der, der aus der VLBI-Lösung erhalten wird, so nimmt die Streuung (der RMS) doch stark ab (10-30%). Die aus den Epochenreferenzrahmen berechneten Zeitreihen der Komponenten der VLBI-Stationspositionen zeigen ein bis zu 50% geringeres Rauschen als die aus den VLBI-Lösungen erhaltenen.

Bei der Ausführung der Kombinationen ergaben sich einige Defizite, deren Behebung wünschenswert wäre:

- die geringe Anzahl und die schlechte globale Verteilung der Stationen, insbesondere der des VLBI- und SLR-Netzes
- der teilweise geringe Beobachtungsumfang der VLBI-Teleskope.
- die geringe Anzahl und die schlechte globale Verteilung der Ko-lokationsstationen
- die Anzahl, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der verfügbaren terrestrischen Differenzvektoren

Der erste der Punkte ist nicht ohne Weiteres umsetzbar, da es einen hohen finanziellen Aufwand bedeuten würde, neue SLR- und VLBI-Teleskope zu installieren. Umsomehr ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass alles getan werden sollte, um zu verhindern, dass vorhandene funktionstüchtige Teleskope außer Betrieb genommen werden, so wie es beispielsweise in den USA teilweise geschehen ist oder angedacht war.

Der zweite Punkt ist ebenfalls nur schwer realisierbar. Ideal wäre es, wenn die VLBI-Teleskope permanent und wenn möglich in einem mehr oder weniger gleichbleibenden Stationsnetz beobachten würden. Auf vielen Stationen befinden sich astronomische Teleskope, die nur zu wenigen ausgewählten Epochen geodätische Beobachtungen durchführen können. Die Beispiele der CONT-Kampagnen und des VLBA-Netzes haben deutlich gemacht, dass die aus VLBI bestimmten Parameter eine große Genauigkeitssteigerung erfahren, wenn permanente Beobachtungen eines homogenen Stationsnetzes vorliegen. Mit dem Projekt VLBI2010 wird vom IVS versucht, die Beobachtungsdichte und -genauigkeit der globalen VLBI-Netze zu verbessern. Wie bei VLBA schon umgesetzt, ist die Installation von Teleskopen gleicher Bauart geplant. Dadurch können die Baukosten gesenkt werden, und die Vergleichbarkeit der Teleskope (zum Beispiel bezüglich der thermischen oder gravitativen Deformation) ist gewährleistet. Die kleinen und beweglichen Teleskope, die in einem breiteren Frequenzspektrum als die bisherigen beobachten sollen und ein besseres Empfangsverhalten haben, werden mehr und homogenere Daten liefern, als sie bisher aus den globalen VLBI-Netzen erhalten wurden. Der Gewinn, den die VLBI aus VLBI2010 erfährt, wird in naher Zukunft deutlich werden.

Die Umsetzung des dritten und vierten Punktes ist realistisch. Ein erster möglicher Schritt zur Verbesserung der Situation bezüglich der Anzahl und Verteilung der Ko-lokationsstationen wäre, allen SLR- und VLBI-Stationen GPS-Stationen beizustellen und für alle Ko-lokationen die Differenzvektoren zu bestimmen. Zum zweiten wäre es wünschenswert, dass regelmäßige Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der Differenzvektoren stattfänden. Damit könnten die Differenzvektoren kontrolliert werden. Die Wiederholungsgenauigkeit würde eine realistische Abschätzung der Genauigkeit der Differenzvektoren ermöglichen. Gegebenenfalls würden durch

die Wiederholungsmessungen auch Deformationen des lokalen Stationsnetzes (beispielsweise das Setzen eines Teleskops) erkennbar. Weiterhin wurde diskutiert, dass die Installation von zwei oder mehr GPS-Stationen je Ko-lokationsstation sinnvoll wäre. Insbesondere die Zeitreihen der GPS-Stationen weisen häufig Unstetigkeiten infolge von Instrumentenwechseln auf. Eine gegenseitige Überwachung der GPS-Stationen direkt vor Ort wäre daher sinnvoll. Positionsänderungen müssten dann bei der Auswertung der Daten nicht notwendigerweise als Unbekannte geschätzt, sondern könnten mit hoher Genauigkeit separat bestimmt und als bekannt in die Auswertung eingeführt werden. Zwar wird durch die Installation mehrerer GPS-Stationen je Ko-lokationsstation das bereits vorhandene „Übergewicht“ der GPS-Stationen noch verstärkt, es wäre aber beispielsweise denkbar, nur je eine GPS-Station auszuwählen, die als Station des globalen IGS-Netzes prozessiert werden soll.

In dieser Arbeit wurde die konsistente Berechnung von Referenzrahmen und EOP durchgeführt. Dies ist auch eine der zentralen Aufgaben des IERS. Aus den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen sollen deshalb einige Vorschläge für die Verbesserung der IERS-Produkte gemacht werden. Diese Empfehlungen beziehen sich auf das Kombinationsmodell, die IERS-Produktpalette oder betreffen eines der Beobachtungsverfahren:

Kombinationsmodell

- Die Vereinheitlichung der Modelle und Parametrisierungen für die Analyse der unterschiedlichen Beobachtungsverfahren ist die wichtigste Voraussetzung, IERS-Produkte mit hoher Genauigkeit und Konsistenz bereitzustellen. Zwar werden in den Konventionen des IERS (MCCARTHY und PETIT 2004) Empfehlungen für Modelle gegeben, jedoch sind diese nicht bindend. Hinzu kommt, dass zur Reduktion eines bestimmten Effektes teilweise mehrere Modelle angegeben werden. Es ist daher notwendig, konkrete Modelle und eine geeignete Parametersierung festzulegen, die innerhalb des IERS als bindend betrachtet werden. Mit dem IERS *Unified Analysis Workshop*, der im Dezember des vergangenen Jahres stattfand und dessen Ziel es war, sich über einheitliche Auswertestandards zu verständigen, ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung bereits geschehen.
- Die Berechnung des ITRF2005 erfolgte in der Weise, dass zunächst die täglichen oder wöchentlichen Eingangslösungen eines Beobachtungsverfahrens zu einem zeitabhängigen TRF kombiniert werden, wobei Parameter einer Ähnlichkeitstransformation zwischen den einzelnen Lösungen geschätzt werden. Diese Vorgehensweise ist im Hinblick auf die Konventionen des IERS bezüglich des ITRS unbedingt als kritisch anzusehen. Durch das Schätzen der Parameter der Ähnlichkeitstransformation ist eine einzelne der Lösungen nicht mehr im Massenzentrum der Erde gelagert und nicht mehr metrisch. Auch wenn die Festlegung des geodätischen Datums der Gesamtlösung mit Hilfe von Summenbedingungen über die geschätzten Transformationsparameter erfolgt, ist die kombinierte Lösung nicht zwingend geozentrisch gelagert und im metrischen System (DREWES 2008). Im Gegenteil: Wenn die Transformationsparameter Anteile der Stationsbewegungen aufnehmen, werden die Transformationsparameter verfälscht, und die kombinierte Lösung kann auch bei Verwendung einer Summenbedingung zur Festlegung des Datums weder streng geozentrisch gelagert noch metrisch sein. Damit sind die Konventionen des IERS nicht erfüllt. Hinzu kommt, dass auch die Geschwindigkeiten der Stationen verfälscht sind. Von der Verwendung einer Ähnlichkeitstransformation in der Kombination ist daher abzuraten. Statt dessen wird empfohlen, die Kombination auf Ebene der Normalgleichungen, beziehungsweise, wenn möglich, auf der Ebene der Beobachtungen durchzuführen.
- Eine Kombination der Beobachtungen, also eine gemeinsame Auswertung der unterschiedlichen Raumbeobachtungsverfahren, wäre empfehlenswert. Da dies jedoch sehr aufwendig ist und bisher nicht mit ausreichender Genauigkeit umgesetzt werden konnte, ist die Kombination homogener erstellter Normalgleichungen eine gute Alternative, da im Gegensatz zur Kombination von Lösungen die Beobachtungen in der Ausgleichung direkt verbessert werden. Nachteilig ist jedoch, dass einzelne Beobachtungen nicht mehr als Ausreißer identifiziert und ausgeschlossen oder neu gewichtet werden können.
- Für die Festlegung der zeitlichen Entwicklung der Orientierung wird die Einführung einer NNR-Bedingung in Bezug auf das plattenkinematische Modell APKIM empfohlen, das neben den starren Lithosphärenplatten auch Deformationszonen berücksichtigt. Es basiert auf geodätischen Beobachtungen und repräsentiert im Vergleich zum geologischen Modell NNR-NUVEL-1A die rezenten Krustenbewegungen sehr gut. Es ermöglicht damit die Berechnung eines erdfesten Referenzrahmens. Ein auf NNR-NUVEL-1A bezogener Referenzrahmen weist hingegen eine Restrotation relativ zur Erdkruste auf (DREWES 2008).
- Bisher wurden bei der Berechnung des ITRF keine saisonalen Variationen der Stationspositionen berücksichtigt. Es wurde gezeigt, dass signifikante saisonale Signale insbesondere in den Höhenkomponenten der

Stationspositionen mit Amplituden von bis zu einigen Zentimetern vorkommen. Um die Millimetergenauigkeit und Geometrietreue der Referenzrahmen zu gewährleisten, müssen diese Signale berücksichtigt werden. Dies ist die zentrale Herausforderung bei der Berechnung neuer ITRF-Lösungen. Ein Vergleich mit geophysikalischen Auflastmodellen ergab, dass ein großer Teil dieser Variationen auf Auflastvariationen zurückzuführen ist. Dennoch sind die geophysikalischen Modelle zu ungenau, um zur Reduktion der Auflasteffekte aus den Beobachtungen verwendet werden zu können. Eine andere Möglichkeit, die saisonalen Variationen zu berücksichtigen, ist ihre Parametrisierung beispielsweise durch das Einführen von jährlichen und halbjährlichen Sinus-Cosinus-Funktionen. Die halbjährlichen Signale haben zwar keine geophysikalische Bedeutung, ermöglichen es aber, die Abweichung des Jahressignals vom Sinussignal weitestgehend zu berücksichtigen. Auch diese zweite Methode muss kritisch betrachtet werden, da möglicherweise die saisonalen Variationen einer Station auch von Jahr zu Jahr Unterschiede aufweisen oder die Bewegungen einiger Stationen durch das jährliche und halbjährliche Signal nur unzureichend approximiert werden. Um eine Methode festzulegen, mit der die Berücksichtigung jahreszeitlicher Signale erfolgen soll, sind noch eingehende Untersuchungen notwendig.

- Bisher beschränken sich die gemeinsamen Parameter der Raumberechnungsverfahren, die bei der Berechnung des ITRF kombiniert werden, auf die Stationskoordinaten, die Polkoordinaten und UT1-UTC. Die Kombination weiterer gemeinsamer Parameter würde zu einer Steigerung von Konsistenz und Genauigkeit der kombinierten Lösung führen. In dieser Arbeit wurden daher zusätzlich die Nutations- und Troposphärenparameter berücksichtigt. Damit wurde Konsistenz zwischen allen geschätzten Parametern erreicht. Zudem wurde die Verringerung der täglichen Wiederholbarkeiten der Stationskoordinaten durch die Kombination der Troposphärenparameter nachgewiesen. In Zukunft sollten weitere gemeinsame Parameter in die Kombination einbezogen werden. Als globale Parameter sind die Translationen des Stationskoordinatennetzes gegenüber dem Massenzentrum der Erde infolge von Massenverlagerungen denkbar. Sie wurden bislang nicht berücksichtigt, da die aus GPS bestimmten Translationen systematische Effekte aufweisen, die nicht auf Massenverlagerungen im Erdsystem sondern auf Modellfehler zurückzuführen sind. Die aus GPS und SLR erhaltenen Translationen sind damit keine gemeinsamen Parameter und dürfen nicht kombiniert werden. Wenn jedoch in Zukunft die Modellfehler behoben sind, ist die Kombination der Translationen ein möglicher Schritt. Werden die Translationen parametrisiert, so bleiben die Deformationen des Erdkörpers infolge der Massenverlagerungen unberücksichtigt. LAVALLÉE *et al.* 2006 entwickelten einen Ansatz, der die Deformation der Erdkruste (Grad-1-Deformation und gegebenenfalls Terme höherer Ordnung) berücksichtigt. Von RÜLKE *et al.* 2008 wurde dieses Verfahren für einen GPS-basierten Referenzrahmen umgesetzt. Die Translationen und Deformationen können auch als zeitvariable Parameter des Erdschwerefeldes dargestellt werden. Langfristiges Ziel von GGOS ist es, ITRF- und zeitvariable Schwerfeldlösungen gemeinsam auszugleichen, um völlige Konsistenz zu erreichen. Die Grad-1-Deformation ist eine geometrische Deformation des Erdkörpers infolge saisonaler Massenverlagerungen im Erdsystem. Während aus VLBI-Beobachtungen die Parameter des Erdschwerefeldes nicht bestimmbar sind, können Grad-1-Deformationen aus der Änderung der Geometrie des VLBI-Stationsnetzes berechnet werden. Von den Deformationen können wiederum Rückschlüsse auf die verursachenden Massenvariationen gezogen werden. VLBI trägt damit direkt zur Bestimmung der Änderung des Erdschwerefeldes bei. Die Berücksichtigung der Translationen und der Grad-1-Deformation hat Vor- und Nachteile: Vorteilhaft ist, dass die Translationen zwischen dem Stationskoordinatennetz und dem Massenzentrum der Erde unter gleichzeitiger Beachtung der Deformation der Erde berücksichtigt und konsistent zu den zeitvariablen Parametern des Erdschwerefeldes geschätzt werden können. Zudem stehen mit den Deformationsparametern weitere globale Parameter, die aus allen hier betrachteten Beobachtungsverfahren geschätzt werden können, für die Kombination zur Verfügung. Nachteilig ist hingegen, dass die Translations- und Deformationsparameter abhängig von der Geometrie der Stationsnetze sind. Bei einer schlechten globalen Verteilung der Stationen werden die Parameter möglicherweise fehlerhaft und führen dann auch zu Fehlern in der Festlegung des Datums. Hinzu kommt, dass durch die Parametrisierung der Deformation nur ein gemeinsamer Anteil der saisonalen Variation der Stationspositionen berücksichtigt wird. Die individuellen Abweichungen der Stationsbewegungen vom gemeinsamen Anteil verbleiben in den Beobachtungen und müssen getrennt berücksichtigt werden. Eine Unterteilung der saisonalen Variation der Stationspositionen in einen gemeinsamen und einen individuellen Anteil ist jedoch physikalisch nicht begründbar. Bei der Anwendung des Referenzrahmens muss diese Unterteilung immer bedacht werden.

Ob die Translationen und Deformationen der Stationskoordinatennetze als globale Parameter zukünftig in der Kombination berücksichtigt werden sollen, muss diskutiert werden. Nutations- und Troposphärenparameter sollten jedoch zukünftig in der Kombination berücksichtigt werden.

- Bei der Auswahl der Differenzvektoren eignen sich die Polkoordinaten hervorragend zur Beurteilung der Konsistenz der Lösung. Sie sollten daher generell für diese Aufgabe herangezogen werden. Die Polkoordi-

naten eignen sich deshalb so gut wie kein anderer Parameter, da sie globale Parameter sind und aus allen betrachteten Beobachtungsverfahren bestimmt werden können.

- Die Verwendung gerechneter Differenzvektoren für die Berechnung täglicher Referenzrahmen wird empfohlen. Dabei muss jedoch bedacht werden, dass es sich bei diesen Differenzvektoren nicht um unabhängige Beobachtungen handelt. Ihre Anwendung sollte deshalb auf die Berechnung von Epochenreferenzrahmen beschränkt bleiben.
- Die Kombination von Troposphärenparametern bei der Berechnung täglicher Referenzrahmen führt zu einer Stabilisierung der einzelnen Lösungen und ist zu empfehlen.
- Die gemeinsame Schätzung von Nutations- und Polparametern sowie deren zeitlicher Ableitungen darf nur über längere Zeiträume (mehrere Wochen) erfolgen, wenn Stetigkeit der Parameter an den Intervallgrenzen gefordert wird (kontinuierlich stückweise stetige Darstellung). Die Korrelationen der Nutationsparameter und Polkoordinaten erreichen dann Werte von weniger als 0.3. Im Fall täglicher Referenzrahmen muss die Schätzung der ersten zeitlichen Ableitungen der Nutationswinkel unterbleiben, da sonst Korrelationen von mehr als 0.8 zwischen Nutationsparametern und Polkoordinaten auftreten und die Parameter in der Ausgleichung nicht mehr sinnvoll trennbar sind.

IERS-Produkte

- Die gemeinsame Ausgleichung von Referenzrahmen und EOP ist beim IERS Standard. Ein weiterer Schritt sollte die gemeinsame und damit konsistente Berechnung von ITRF, EOP und ICRF sein. Wegen der Kürze des Beobachtungszeitraumes konnte dies leider in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden. Von TESMER *et al.* (2004) wurde eine gemeinsame Schätzung von Stationskoordinaten, EOP und den Koordinaten der Radioquellen auf der Grundlage von VLBI-Beobachtungen erstmalig erfolgreich durchgeführt.
- Das Ziel, tägliche Referenzrahmen zu berechnen, sollte vom IERS unbedingt verfolgt werden, da der Informationsgehalt der Epochenlösungen wesentlich höher ist, als der des zeitabhängigen Referenzrahmens zur entsprechenden Epoche.

Beobachtungsverfahren

- Eine Überwachung der terrestrischen Differenzvektoren durch Wiederholungsmessungen ist unbedingt zu empfehlen. Möglicherweise wäre eine Koordination durch den IERS sinnvoll.
- Ein großes Problem bei der Auswertung insbesondere der GPS-Beobachtungen besteht darin, dass vorhandene Korrelationen zwischen den Beobachtungen nicht oder in nicht ausreichendem Maß berücksichtigt werden. Die geschätzten Standardabweichungen sind deshalb zu optimistisch. Bei der Kombination mit anderen Raumbeobachtungsverfahren muss diese „Überschätzung“ der Genauigkeit durch die Wahl eines geeigneten Varianzfaktors berücksichtigt werden. Die Entwicklung eines realistischen stochastischen Modells für die GPS-Auswertung ist daher sehr wünschenswert.
- Ein weiteres zentrales Problem entsteht dadurch, dass die VLBI-Sessions variierende Anfangs- und Endzeitpunkte haben, die von 0 Uhr verschieden sind. Die Referenzepochen der aus VLBI bestimmten Parameter (EOP und Troposphärenparameter) stimmen deshalb nicht mit denen der aus GPS und SLR bestimmten Parameter überein. Für eine Kombination muss daher eine Epochentransformation der aus VLBI bestimmten Parameter durchgeführt werden, wodurch die Genauigkeit dieser Parameter reduziert wird. VLBI-Sessions mit Beobachtungen von 0 Uhr bis 24 Uhr wären daher empfehlenswert. Der Beitrag von VLBI zu den kombinierten Lösungen würde damit erhöht.

Diese Empfehlungen ergeben sich mehrheitlich direkt aus den Untersuchungen in dieser Arbeit. Ihre Umsetzung würde die Qualität zukünftiger Kombinationsprodukte steigern und die Aussagekraft der aus GGOS gewonnenen Ergebnisse erhöhen.

Literatur

- ABSHIRE, J. B. und C. S. GARDNER (1985): *Atmospheric refractivity corrections in satellite laser ranging*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-23: 414–425.
- ALTAMIMI, Z., X. COLLILIEUX, J. LEGRAND, B. GARAYT und C. BOUCHER (2007): *ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth orientation parameters*, Journal of Geophysical Research, 112(B09401).
- ALTAMIMI, Z., P. SILLARD und C. BOUCHER (2002): *ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications*, Journal of Geophysical Research, 107(B10).
- ANDERSEN, P. H. (2000): *Multi-level arc combination with stochastic parameters*, Journal of Geodesy, 74: 531–551.
- ANGERMANN, D., H. DREWES, M. KRÜGEL, B. MEISEL, M. GERSTL, R. KELM, W. S. H. MÜLLER und V. TESMER (2004): *ITRS Combination Centre at DGFI: A terrestrial reference frame realization 2003*, Reihe B 313, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- ANGERMANN, D., M. KRÜGEL, B. MEISEL, H. MÜLLER und V. TESMER (2005): *Time evolution of terrestrial reference frame*, In: SANSO, F. (Hrsg.), *A Window on the future of Geodesy, IAG Symposia*, 9–14, IAG Symposia 128, Springer, Berlin.
- AOKI, S., B. GUINOT, G. KAPLAN, H. KINOSHITA, D. D. MCCARTHY und P. K. SEIDELMANN (1982): *The new definition of universal time*, Astronomy and Astrophysics, 105: 359–361.
- APPLEBY, G. (1995): *Center of Mass Correction for Lageos and Etalon for Single Photon Ranging Systems*, In: SINCLAIR, A. (Hrsg.), *Proc. of Annual Eurolas Meeting, Munich, 1995*, 18–26, Royal Greenwich Observatory, Cambridge.
- ASHBY, N. und J. SPILKER (1996): *Introduction to relativistic effects on Global Positioning System*, In: B. PARKINSON und J. SPILKER (Hrsg.), *Global Positioning System: Theory and applications*, Bd. 1, American Institute of Aeronautics, Washington.
- BAR-SEVER, Y. E. und P. M. KROGER (1998): *Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver*, Journal of Geophysical Research, 103(B3): 5019–5035.
- BARKIN, Y. (1999): *Secular effects in the motion of the Earth's center of masses*, In: RAY, J. (Hrsg.), *IERS Analysis Campaign to Investigate Motions of the Geocenter*, 3–13, IERS Technical Note 25, Observatoire de Paris.
- BASSIRI, S. und G. A. HAJJ (1993): *Higher-order ionospheric effects on the Global Positioning System observables and means of modeling them*, manuscripta geodaetica, 18: 280–289.
- BERG, H. (1984): *Allgemeine Meteorologie*, Dümmler, Bonn.
- BEUTLER, G., I. MUELLER und R. NEILAN (1996): *The International GPS Service for Geodynamics: The Story*, In: BEUTLER U. A. (Hrsg.), *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications*, IAG Symposia 113, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- BLEWITT, G., D. LAVALLEE, P. CLARKE und K. NURUTDINOV (2001): *A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected*, Science, 294: 2343–2345.
- BÖHM, J. und H. SCHUH (2004): *Vienna mapping functions in VLBI analyses*, Geophysical Research Letters, 31(L01603).
- BÖHM, J. und H. SCHUH (2007): *Troposphere gradients from the ECMWF in VLBI analysis*, Journal of Geodesy, 81: 403–408.
- BÖHM, J., B. WERL und H. SCHUH (2006): *Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data*, Journal of Geophysical Research, 111(B02406).
- BOUILLE, F., A. CAZENAVE, J. M. LEMOINE und J.-F. CRETAUX (2000): *Geocentre motions from the DORIS space system and laser data on LAGEOS satellites: Comparison with surface loading data*, Geophysical Journal International, 143: 71–82.
- BOURDA, G. (2008): *Length-of-day and space-geodetic determination of the Earth's variable gravity field*, Journal of Geodesy, 82(4-5): 295–305.
- BRUNNER, F. K. und J. M. RÜEGER (1992): *Theory of the local scale parameter method for EDM*, Bulletin Geodesique, 66: 355–364.
- BRZEZINSKI, A. (1992): *Polar motion excitation by variations of the effective angular momentum functions: considerations concerning deconvolution problem*, manuscripta geodaetica, 17: 3–20.
- BRZEZINSKI, A. und S. BOLOTIN (2006): *Atmospheric and oceanic excitation of the free core nutation: observational evidence*, In: *Proceedings of the Journées Systèmes de Référence Spatio-Temporels 2005, Warsaw*, 211–214, Space Research Centre PAS, Warsaw.
- CHEN, J. und T. HERRING (1997): *Effects of the atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data*, Journal of Geophysical Research, 102(B9): 20489–20502.
- CHEN, J., C. WILSON, R. EANES und R. NEREM (1999): *Geophysical interpretation of observed geocenter variations*, Journal of Geophysical Research, 104(B2): 2683–2689.
- CIDDOR, P. und J. HILL (1999): *Refractive index of air. 2. Group index*, Applied optics, 38: 1663–1667.
- COULOT, D., P. BERIO, R. BIANCALE, S. LOYER, L. SOUDARIN und A.-M. GONTIER (2007): *Toward a direct combination of space-geodetic techniques at the measurement level: Methodology and*

- main issues,, Journal of Geophysical Research, 112(B05410).
- DACH, R., U. HUGENTOBLE, P. FRIDEZ und M. MEINDL (2007): *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern.
- DAVIS, J., G. ELGERED, A. NIELL und C. KUEHN (1993): *Ground-based Measurements of Gradients in the "Wet" radion refractivity of air*, Radio Science, 28: 1003–1018.
- DAVIS, J., T. HERRING, I. SHAPIRO, A. ROGERS und G. ELGERED (1985): *Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modelling Errors on Estimates of Baseline length*, Radio Science, 20: 1593–1607.
- DAWSON, J., G. JOHNSTON und B. TWILLEY (2005(a)): *The Determination of Telescope and Antenna Invariant Point (IVP)*, In: RICHTER, B., W. SCHWEGMANN und W. DICK (Hrsg.), *Proc. of the IERS Workshop on site co-location. Matera, Italy, 2003*, 128–134, IERS Technical Note 33, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- DAWSON, J., P. SARTI, J. GARY und L. VITTUARI (2007): *Indirect approach to invariant point determination for SLR and VLBI systems: an assessment*, Journal of Geodesy, 81: 433–441.
- DAWSON, J., O. TITOV, G. JOHNSTON, S. NAEBKHIL, A. WOODS, und R. GOVIND (2005): *The Impact of Gravitational Sag on VLBI Results of the Hobart, Mt. Pleasant Radio Observatory*, Geophysical Research Abstracts, 7(02940).
- DEGNAN, J. J. (1993): *Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review*, In: SMITH, D. E. und D. L. TURCOTTE (Hrsg.), *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology*, 133–162, AGU Geodynamics Series 25.
- DEMETS, C., R. G. GORDON, D. F. ARGUS und S. STEIN (1994): *Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimate of current plate motions*, Geophysical Research Letters, 21(20).
- DESAY, S. (2002): *Observing the pole tide with satellite altimetry*, Journal of Geophysical Research, 107(C11): 7.1–7.13.
- DIETRICH, R. (1988): *Untersuchungen zur Nutzung künstlicher Erdsatelliten für die geodätische Koordinatenbestimmung*, Veröffentlichungen des Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam 96.
- DIETRICH, R., M. SCHEINERT und W. KORTH (1988): *The Verification of the Solid Earth Response on Changing Ice Loads: A Geodetic Project in West Greenland.*, In: WU, P. (Hrsg.), *Dynamics of the Ice Age Earth: A Modern Perspective.*, Bd. 3-4 von *GeoResearch Forum*, 509–522, Trans Tech Publications, Uetikon-Zürich.
- DONG, D., J. O. DICKEY, Y. CHAO und M. K. CHENG (1997): *Geocenter variations caused by atmosphere, ocean and surface ground water*, Geophysical Research Letters, 25(15): 1867–1869.
- DOODSON, A. T. (1928): *The analysis of tidal observations*, Philosophical Transactions of the Royal Society of South Africa, A 227: 223–279.
- DREWES, H. (1998): *Combination of VLBI, SLR and GPS Determined Station Velocities for Actual Plate Kinematics and Crustal Deformation Models*, In: FEISSEL, M. (Hrsg.), *Geodynamics, IAG Symposia*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- DREWES, H. (2002): *Die Entwicklung der geometrischen Referenzsysteme in der Geodäsie*, In: ALBERTZ, J., H.-P. BÄHR, H. HORNIK und R. RUMMEL (Hrsg.), *Am Puls von Raum und Zeit - 50 Jahre Deutsche Geodätische Kommission - Festschrift*, 47–53, Reihe E 26, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- DREWES, H. (2008): *Reference Systems, Reference Frames, and the Geodetic Datum - basic considerations*, In: *Proceedings of the IUGG General Assembly XXIV, Perugia, 2.-13.7.2007*, akzeptiert, IAG Symposia, Springer, Berlin Heidelberg.
- DREWES, H. und D. ANGERMANN (2001): *The actual plate kinematic and crustal deformation model 2000 (APKIM 2000) as a geodetic reference system*, IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 05.-06.09.2001.
- DREWES, H. und D. ANGERMANN (2003): *Remarks on some problems in the combination of station coordinate and velocity solutions*, In: RICHTER, B., W. SCHWEGMANN und W. DICK (Hrsg.), *Proc. of the IERS Workshop on Combination Research and Global Geophysical Fluids*, 30–32, IERS Technical Note 30, Bundesamt für Geodäsie und Kartographie, Frankfurt am Main.
- DREWES, H., D. ANGERMANN, M. GERSTL, M. KRÜGEL, B. MEISEL und W. SEEMÜLLER (2006): *Analysis and refined computations of the International Terrestrial Reference Frame*, In: FLURY, J., R. RUMMEL, C. REIGBER, M. ROTHACHER, G. BOEDECKER und U. SCHREIBER (Hrsg.), *Observation of the Earth System from Space*, Springer, Berlin Heidelberg.
- DREWES, H. und O. HEIDBACH (2005): *Deformation of the South American crust estimated from finite element and collocation methods*, In: SAN-SO, F. (Hrsg.), *A window of the future of geodesy*, 544–549, IAG Symposia 128, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- DREWES, H. und B. MEISEL (2003): *An actual plate motion and deformation model as a kinematic terrestrial reference system*, In: *Geotechnologies Science Report*, Bd. 3, 40–43, Koordinationsbüro Geotechnologien, Potsdam.
- DZIEWONSKI, A. und D. ANDERSON (1981): *Preliminary reference Earth model*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 25: 297–356.
- DÖLL, P., F. KASPAR und B. LEHNER (2003): *A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation*, Journal of Hydrology, 270: 105–134.
- ELGERED, G. (1993): *Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry*, In: JANSAN, M. A. (Hrsg.), *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*, 218–258, Wiley & Sons, Inc., New York.

- ELGERED, G., J. DAVIS, T. HERRING und I. SHAPIRO (1991): *Geodesy by Radio Interferometry: Water Vapor Radiometry for Estimation of the wet Delay.*, Journal of Geophysical Research, 96(B4): 6541–6555.
- ELGERED, G. und R. HAAS (2003): *The Geodetic VLBI Network Station at the Onsala Space Observatory - Activities in 2002 -*, In: SCHWEGMANN, W. und V. THORANDT (Hrsg.), *Proc. of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 61–66, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- ELGERED, G. und P. LUNDH (1983): *A dual channel water vapor radiometer system*, Research Report 145, Chalmers University of Technology, Research Laboratory of Electronics and Onsala Space Observatory, Onsala.
- ESSEN, L. und K. D. FROOME (1951): *The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24000 Mc/s*, In: *Proc. of the Royal Society B* 64, 862–875.
- FARRELL, W. (1972): *Deformation of the Earth by surface loads*, Reviews of Geophysics and Space Physics, 10: 761–797.
- FEISSEL, M. und F. MIGNARD (1998): *The adoption of the ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences*, Astronomy and Astrophysics, 331: L33–L36.
- FRITSCHKE, M., R. DIETRICH, C. KNÖFEL, A. RÜLKE, S. VEY, M. ROTHACHER und P. STEIGENBERGER (2005): *Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates*, Geophysical Research Letters, 32(L23311).
- FUKUMORI, I. (2002): *A partitioned Kalman filter and smoother*, Monthly Weather Review, 130: 1370–1383.
- GEODESIST'S HANDBOOK (1992): Bulletin Geodésique, 66.
- GERSTL, M. (1999): *Bezugssysteme der Satellitengeodäsie*, In: 3. DFG-Rundgespräch zum Thema *Bezugssysteme*, 110–119, Reihe A 116, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- GERSTL, M., R. KELM, H. MÜLLER und W. EHRNSPERGER (2000): *DOGSCS Kombination und Lösung großer Gleichungssysteme*, Interner Bericht, DGFI, München.
- GIBSON, J. K., S. UPPALA, A. HERNANDEZ, A. NOMURA und E. SERRANO (1997): *ERA Descriptions*, ECMWF ERA-15 Project Report Series 1.
- GIPSON, J. und C. MA (1998): *Site displacement due to variation in Earth rotation*, Journal of Geophysical Research, 103: 7337–7350.
- GONTIER, A., F. ARIAS und C. BARACHE (2006): *The maintenance of the ICRF using the most stable sources*, In: SOUCHAY, J. und M. FEISSEL (Hrsg.), *The International Celestial Reference System and Frame - ICRS Center Report for 2001-2004*, 7–19, IERS Technical Note 34, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- GRADINARSKY, L., R. HAAS, J. M. JOHANSSON und G. ELGERED (1999): *Comparison of atmospheric parameters estimated from VLBI, GPS and microwave radiometer data*, In: SCHLÜTER, W. und H. HASE (Hrsg.), *Proc. of the 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 1161–1165.
- GREFF-LEFFTZ, M. (2000): *Secular variation of the geocenter*, Journal of Geophysical Research, 105: 25685–25692.
- GROSS, R. S., I. FUKUMORI und D. MENEMENLIS (2003): *Atmospheric and oceanic excitation of the Earth's wobbles during 1980-2000*, Journal of Geophysical Research, 108(B8): 2370–2385.
- GROSS, R. S., I. FUKUMORI, D. MENEMENLIS und P. GEGOUT (2004): *Atmospheric and oceanic excitation of length-of-day variations during 1980-2000*, Journal of Geophysical Research, 109(B01406).
- GROSS, R. S. und U. J. LINDQWISTER (1992): *Atmospheric excitation of polar motion during the GIG '91 measurement campaign*, Geophysical Research Letters, 19(9): 849–852.
- GURTNER, W., R. NOOMEN und M. R. PEARLMAN (2004): *The International Laser Ranging Service: current status and future developments*, Advanced Space Research, 36: 327–332.
- HAAS, R. (1996): *Untersuchungen zu Erddeformationsmodellen für die Auswertung von geodätischen VLBI-Messungen*, Reihe C 466, Deutsche Geodätische Kommission, Frankfurt am Main.
- HAAS, R. und C. ESCHELBACH (2005): *The 2002 Local Tie at the Onsala Space Observatory*, In: RICHTER, B., W. SCHWEGMANN und W. R. DICK (Hrsg.), *Proc. IERS Workshop on site collocation*, 55–63, IERS Technical Note 33, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- HAAS, R. und H.-G. SCHERNECK (1999): *The Effect of Ocean Tide Loading on the Determination of Earth Rotation Parameters*, In: SCHLÜTER, W. und H. HASE (Hrsg.), *Proc. of the 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 178–185.
- HAZARD, C., J. SUTTON, A. N. ARGUE, C. N. KENWORTHY, L. V. MORRISON und C. A. MURRAY (1971): *Accurate radio and optical positions of 3C273B*, Nature Physical Science, 233: 89.
- HEINKELMANN, R., J. BOEHM, H. SCHUH, S. BOLOTIN, G. ENGELHARDT, D. MACMILLAN, M. NEGUSINI, E. SKURIKHINA, V. TESMER und O. TITOV (2007): *Combination of long time-series of troposphere zenith delays observed by VLBI*, Journal of Geodesy, 81: 483–501(19).
- HENNES, M., R. HAAS und C. ESCHELBACH (2004): *Industriemesssysteme zur Qualitätssteigerung von VLBI-Ergebnissen*, In: INGENSAND, H. (Hrsg.), *Proc. of the 14th International Meeting of Engineering Surveying*, 107–118, Zürich.
- HERRING, T. (1992): *Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data*, In: DEMUNK, J. und T. SPOELSTRA (Hrsg.), *Refraction of the Tropospheric Signals in Geodesy*, 157–164, Publications on Geodesy 36, Netherlands Geodetic Commission.

- HOFMANN-WELLENHOF, B., H. LICHTENEGGER und J. COLLINS (1997): *GPS - Theory and Practice*, Springer, Wien.
- HUGENTOBLER, U., S. SCHAER, R. DACH, M. MEINDL, C. URSCHL und G. BEUTLER (2005): *Relevance of GNSS Geocenter for Precise Point Positioning*, European Geoscience Union, General Assembly 2005, Vienna, Austria, 25.-29. April, 2005.
- HULLEY, G., E. PAVLIS, V. MENDES und D. PAVLIS (2004): *Multiwavelength Refraction Modeling Improvements for SLR Observations*, In: GARATE, J. und J. M. DAVILA (Hrsg.), *Proc. of the 14th International Laser Ranging Workshop*, Royal Observatory of the Navy, San Fernando.
- HUYBRECHTS, P. (1992): *The antarctic ice sheet and environmental change: a three dimensional modelling study*, Berichte zur Polarforschung 99/92, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
- HUYBRECHTS, P. und E. LEMEUR (1998): *Present-day uplift patterns over Greenland from a coupled ice-sheet/visco-elastic bedrock model*, Geophysical Research Letters, 25: 3951–3954.
- JAMES, T. S. und E. R. IVINS (1998): *Prediction of Antarctic crustal motions driven by present-day ice sheet evolution and by isostatic memory of the Last Glacial Maximum*, Journal of Geophysical Research, 103(B3): 4993–5017.
- JOHNSTON, G. und J. DAWSON (2004(a)): *The 2003 Yarragadee Moblas 5 local tie survey*, Geoscience Australia, Record 2004/19.
- JOHNSTON, G. und J. DAWSON (2004(b)): *The 2003 Mount Pleasant (Hobart) radio telescope local tie survey*, Geoscience Australia, Record 2004/21.
- KALNAY, E., M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOLLEN, Y. ZHU, M. CHELLIAH, W. EBISUZAKI, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K. C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, A. LEETMAA, R. REYNOLDS, R. JENNE und D. JOSEPH (1996): *The NMC/NCAR 40-year reanalysis project*, Bulletin of the American Meteorological Society, 77: 437–471.
- KANIUTH, K. und S. VETTER (2006): *Estimating atmospheric pressure loading regression coefficients from GPS observations*, GPS Solutions, 10(2): 135–140.
- KELM, R. (2003): *Rank defect analysis and variance component estimation for inter-technique combination*, In: RICHTER, B., W. SCHWEGMANN und W. R. DICK (Hrsg.), *Proc. of the IERS Workshop on Combination Research and Global Geophysical Fluids, November 2002*, 112 – 114, IERS Technical Note 30, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- KINOSHITA, H. und T. SASAO (1989): *Theoretical aspects of the Earth rotation*, In: KOVALEVSKY, J., I. I. MÜLLER und B. KOLACZEK (Hrsg.), *Reference frames in Astronomy and Geophysics*, 173 – 211, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- KLOBUCHAR, J. (1996): *Ionospheric Effects on GPS*, In: PARKINSON, B. W. und J. J. SPILKER (Hrsg.), *Global Positioning System: theory and applications*, 485–515, Nr. 164 In Process in Astronautics and Aeronautics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington.
- KLOSE, B. (2008): *Meteorologie*, Springer, Bonn.
- KOCH, K. (1997): *Parameterschätzung und Hypothesentests*, Dümmler Verlag, Bonn.
- KOCH, K. (1999): *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- KOVALEVSKY, J., I. I. MUELLER und B. KOLACZEK (1989): *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- KRÜGEL, M. und D. ANGERMANN (2007): *Frontiers in the combination of space geodetic techniques*, In: TREGONING, P. und C. RIZOS (Hrsg.), *Dynamic Planet 2005 - Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools*, 158–165, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- KRÜGEL, M., V. TESMER, D. ANGERMANN, D. THALLER, M. ROTHACHER und R. SCHMID (2004): *CONT02 Campaign - Combination of VLBI and GPS*, In: VANDENBERG, N. R. und K. D. BAVER (Hrsg.), *IVS 2004 General Meeting Proceedings*, 418–422, NASA/CP-2004-212255, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
- KRÜGEL, M., D. THALLER, V. TESMER, M. ROTHACHER, D. ANGERMANN und R. SCHMID (2007): *Tropospheric Parameters: Combination studies based on homogeneous VLBI and GPS data*, Journal of Geodesy, 81(6-8): 515–527.
- LAMBECK, K. (1988): *Geophysical Geodesy*, Clarendon Press, Oxford.
- LANGLEY, R. B. (1996): *Propagation of the GPS Signals*, In: TEUNISSEN, P. und A. KLEUSBERG (Hrsg.), *GPS for Geodesy*, Springer, Berlin.
- LAVALLÉE, D. A., T. V. DAM, G. BLEWITT und P. J. CLARKE (2006): *Geocenter motion from GPS: A unified observation model*, Journal of Geophysical Research, 111: B05405.
- LEFEVRE, F., F. H. LYARD, C. LE PROVOST und E. J. O. SCHRAMA (2002): *FES99: a global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19: 1345–1356.
- LEICK, A. (1995): *GPS Satellite Surveying*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York.
- LIESKE, J. H., T. LEDERLE, W. FRICKE und B. MORANDO (1977): *Expression for the Precession Quantities Based upon the IAU (1976) System of Astronomical Constants*, Astronomy and Astrophysics, 58: 1–16.
- LOHMAR, F. (1985): *Zur Berechnung ionosphärischer Refraktionskorrekturen für VLBI-Beobachtungen aus simultanen Dopplermessungen nach Satelliten*, Mitteilungen aus den Geodätischen

- Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn 67, Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- MA, C., E. F. ARIAS, T. M. EUBANKS, A. L. FEY, A.-M. GONTIER, C. S. JACOBS, O. J. SOVERS, B. A. ARCHINAL und P. CHARLOT (1998): *The International Celestial Reference Frame as realized by very long baseline interferometry*, *Astronomical Journal*, 116: 516–546.
- MACMILLAN, D. (1995): *Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations*, *Geophysical Research Letters*, 22: 1041–1044.
- MACMILLAN, D. und J. GIPSON (1994): *Atmospheric pressure loading parameters from very long baseline interferometry observation*, *Journal of Geophysical Research*, 99(B9): 18081–18087.
- MADER, G. (1999): *GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey*, *GPS Solutions*, 3(1): 50–58.
- MALBERG, H. (2002): *Meteorologie und Klimatologie*, Springer Berlin Heidelberg New York.
- MARINI, J. (1972): *Corrections of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile*, *Radio Science*, 7: 223–231.
- MARINI, J. W. und C. W. MURRAY (1973): *Corrections of Laser Range Tracking Profile for Atmospheric Refraction at Elevation above 10 degrees*, NASA Report X-591-73-351, Greenbelt, MD.
- MATHEWS, P. M. (2000): *Improved Models for Precession and Nutation*, In: JOHNSTON, J., D. MCCARTHY, B. LUZUM und G. KAPLAN (Hrsg.), *Towards Models and Constants for Sub-Microarcsecond Astrometry*, 212–222, Proc. of IAU Colloquium 180, Washington.
- MATHEWS, P. M., B. A. BUFFET, T. A. HERRING und I. I. SHAPIRO (2002): *Modelling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior*, *Journal of Geophysical Research*, 107(B4).
- MCCARTHY, D. (1992): *IERS Standards 1992*, IERS Technical Note 13.
- MCCARTHY, D. und G. PETIT (2004): *IERS Conventions 2003*, Frankfurt am Main.
- MCCARTHY, D. D. (1996): *IERS Conventions (1996)*, IERS Technical Note 21, Central Bureau of IERS, Observatoire de Paris.
- MEERKÖTTER, R., P. BISSOLLI und G. GESELL (2004): *Eine 15 jährige Wolkenklimatologie für Europa aus NOAA/AVHRR Daten im Vergleich zu Bodenbeobachtungen*, In: *Klimastatusbericht 2004*, 24–30, Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- MEISEL, B., D. ANGERMANN, M. KRÜGEL, H. DREWES, H. GERSTL, R. KELM, H. MÜLLER, W. SEEMÜLLER und V. TESMER (2005): *Refined approaches for terrestrial reference frame computations*, *Advances in Space Research*, 36(3): 350–357.
- MEISEL, B., M. KRÜGEL und D. ANGERMANN (2008): *Improved parameterization in the computation of a terrestrial reference frame*, In: *Geophysical Research Abstracts 10, EGU2008-A-06741*, 24–30, EGU General Assembly 2008.
- MENDES, V. und E. PAVLIS (2004): *High-accuracy zenith delay at optical wavelengths*, *Geophysical Research Letters*, 31(L14602).
- MENDES, V., G. PRATES, E. PAVLIS, D. PAVLIS, und R. LANGLEY (2002): *Improved mapping functions for atmospheric refraction correction in SLR*, *Geophysical Research Letters*, 29(10, 1414): 53.1–53.4.
- MERVART, L. (2000): *Combining of Global Positioning System Solutions*, Dsc. Thesis, Czech Technical University Prague.
- MILLY, P. und A. B. SHMAKIN (2002): *Global modeling of land water and energy balances. Part I: The land dynamic (LAD) model*, *Journal of Hydrometeorology*, 3(3): 283–299.
- MONTAG, H., G. GENDT und P. WILSON (1996): *On the determination of the terrestrial reference frame by SLR and GPS techniques*, *Journal of Geodynamics*, 22(1/2): 63–77.
- MORITZ, H. (1980): *Geodetic Reference System 1980*, *Bulletin Géodésique*, 54: 395–405.
- MORITZ, H. (2000): *Geodetic Reference System 1980*, *Journal of Geodesy*, 74: 128–133.
- MORITZ, H. und I. MÜLLER (1987): *Earth Rotation: Theory and observation*, Ungar Publishing Company, New York.
- MÜLLER, J. und V. TESMER (2002): *Investigation of tidal effects in Lunar Laser Ranging*, *Journal of Geodesy*, 76: 232–237.
- MUNK, W. H. und G. J. F. McDONALD (1960): *The Rotation of the Earth*, Cambridge University Press, New York.
- NAPIER, P. J. (1995): *The VLBA Design*, In: ZENSUS, J. A., P. DIAMOND und P. J. NAPIER (Hrsg.), *Very Long Baseline Interferometry and the VLBA*, 59–72, ASP Conference Series 82.
- NIELL, A. (1996): *Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*, *Journal of Geophysical Research*, 101: 3227–3246.
- NIELL, A. (2000): *Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS*, *Earth Planets and Space*, 52: 699–702.
- NIELL, A., A. COSTER, V. SOLHEIM, F.S. AMD MENDES, P. TOOR, R. LANGLEY und C. UPHAM (2001): *Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Radiometry, GPS and VLBI*, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18: 830–850.
- NIELL, A., A. WHITNEY, W. PETRACHENKO, W. SCHLÜTER, N. VANDENBERG, H. HASE, Y. KOYAMA, C. MA, H. SCHUH und G. TUCCARI (2005): *VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems*, In: BEHREND, D. und K. BAVER (Hrsg.), *IVS 2005 Annual Report*, Bd. NASA/TP-2006-214136, 13–40.
- NIEMEIER, W. (2002): *Ausgleichsrechnung*, de Gruyter, Berlin, New York.
- NOTHNAGEL, A. (2000): *Der Einfluß des Wasserdampfes auf die modernen raumgestützten Messverfahren*, Habilitationsschrift, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

- NRAO (1988): *Very Long Baseline Array*, Project Book (Version 7), National Radio Astronomy Observatory.
- OTSUBO, T. und G. APPLEBY (2003): *System-dependent center-of-mass correction for spherical geodetic satellites*, Journal of Geophysical Research, 108(B4).
- OTSUBO, T., T. KUBO-OKA, T. GOTOH und R. ICHIKAWA (2004): *Atmospheric Loading Blue-Sky Effects on SLR Station Coordinates*, 2004 AGU Fall Meeting.
- PAVLIS, E. C. (2003): *The SLR Contribution to the ITRF Monitoring the Origin of the TRF with Space Geodetic Techniques*, In: NOOMEN, R., S. KLOSKO, C. NOLL und M. PEARLMAN (Hrsg.), *Proc. of the 13th International Laser Ranging Workshop, October 2002*, NASA/CP-2003-212248.
- PELTIER, W. (1994): *Ice Age Paleotopography*, Science, 265: 195–201.
- PELTIER, W. R. (2004): *Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE*, Annual Review of Earth and Planetary Science, 32: 111–149.
- PETROV, L. (1998): *Steps Towards Phase Delay VLBI*, In: Schlüter, W, H. Hase (eds): Proc. of the 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astronomy, 1999, 144–151.
- POTTIAUX, E. und R. WARNANT (2002): *First comparisons of precipitable water vapour estimation using GPS and water vapour radiometers at the Royal Observatory of Belgium*, GPS Solutions, 6: 11–17.
- RABELL, W. und J. ZSCHAU (1985): *Static deformations and gravity changes at the earth surface due to atmospheric loading*, Journal of Geophysics, 56: 81–99.
- RADIOMETRICS CORP. (1999): *WVR-1100 Total Integrated Water Vapor and Liquid Water Radiometer Manual*.
- RAY, R. (1999): *A Global Ocean Tide Model from TOPEX/POSEIDON Altimetry: GOT99.2*, Technical Memorandum, NASA/TM-1999-209478, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
- RODELL, M., P. R. HOUSER, U. JAMBOR, J. GOTTSCHALCK, K. MITCHELL, C.-J. MENG, K. ARSENAULT, B. COSGROVE, J. RADAKOVICH, M. BOSILOVICH, J. K. ENTIN, J. P. WALKER, D. LOHMANN und D. TOLL (2004): *The Global Land Data Assimilation System*, Bulletin of the American Meteorological Society, 85(3): 381–394.
- ROTHACHER, M. (2002): *Estimation of station heights with GPS*, In: DREWES, H., A. DODSON, L. FORTES, L. SANCHEZ. und P. SANDOVAL (Hrsg.), *Vertical Reference Systems*, 81–90, IAG Symposia 142, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- ROTHACHER, M. (2003): *Towards a Rigorous Combination of Space Geodetic Techniques*, In: RICHTER, B., W. SCHWEGMANN und W. R. DICK (Hrsg.), *Proc. of the IERS Workshop on Combination Research and Global Geophysical Fluids, Munich, 2003*, 7–18, IERS Technical Note 30, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- ROTHACHER, M., G. BEUTLER, T. HERRING und R. WEBER (1999): *Estimation of nutation using Global Positioning System*, Journal of Geophysical Research, 104(B3): 4835–4859.
- ROTHACHER, M. und S. SCHAER (1994): *GPS-Auswertetechniken*, In: *GPS-Leistungsbilanz '94, Beiträge zum 34. DVW-Seminar*, 107–121, Schriftenreihe des DVW 18, Konrad Wittwer, Stuttgart.
- RÜLKE, A., R. DIETRICH, M. FRITSCHKE, M. ROTHACHER und P. STEIGENBERGER (2008): *Realization of the Terrestrial Reference System by a reprocessed global GPS network*, Journal of Geophysical Research, akzeptiert.
- RUMMEL, R., H. DREWES und G. BEUTLER (2002): *Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS): A candidate IAG Project*, In: *Vistas for Geodesy in the New Millennium*, 609–614, IAG Symposia 125, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- RUMMEL, R., M. ROTHACHER und G. BEUTLER (2005): *Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS) - science rationale*, Journal of Geodynamics, 40(4-5): 357–362.
- SAASTAMOINEN, J. (1972): *Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites*, In: HENRIKSEN, S. W., A. MANCINI und B. H. CHOVITZ (Hrsg.), *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 247–251, Geophysical Monograph 15, American Geophysical Union, Washington.
- SAASTAMOINEN, J. (1973): *Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction, Part II*, Bulletin Géodésique, 107: 13–34.
- SARTI, P., P. SILLARD und L. VITTUARI (2004): *Surveying co-located space-geodetic instruments for ITRF computation*, Journal of Geodesy, 78: 210–222.
- SCHEINERT, M., E. IVANS, R. DIETRICH und A. RÜLKE (2006): *Vertical Crustal Deformation in Dronning Maud Land, Antarctica: Observation versus Model Prediction*, In: FÄTTERER, D., D. DAMASKE, G. KLEINSCHMIDT, H. MILLER und F. TESSENHOHN (Hrsg.), *Antarctica*, 357–360, Springer, Berlin Heidelberg.
- SCHERNECK, H. (1991): *A Parametrised Solid Earth Tide Model and Ocean Tide Loading Effects for Global Geodetic Baseline Measurements*, Geophysical Journal International, 106: 677–693.
- SCHERNECK, H. und R. HAAS (1999): *Effect of horizontal displacements due to ocean tide loading on the determination of polar motion and UT1*, Geophysical Research Letters, 26: 501–504.
- SCHERNECK, H., R. HAAS und M. BOS (2002): *Station Motion Model*, In: CAMPBELL, J., R. HAAS und A. NOTHNAGEL (Hrsg.), *Measurements of Vertical crustal motion in Europe by VLBI*, TMR Network FMRX-CT96-0071 Scientific Report 1996-2001, Bonn.

- SCHILLAK, S. (2004): *Analysis of the Process of the Determination of Station Coordinates by Satellite Laser Ranging Based on Results of the Borowiec SLR Station in 1993.5 - 2000.5*, Artificial Satellites, 39(3).
- SCHLÜTER, W., M. ROTHACHER und V. LECHNER (2005): *Footprint Network: GPS-Monitoring of the Fundamental Station Wettzell*, In: *Proc. of the IERS Workshop on Site Co-location, Matera, 2003*, IERS Technical Note 33, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- SCHMID, R. und M. ROTHACHER (2003): *Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations on GPS satellites*, Journal of Geodesy, 77(7-8): 440-446.
- SCHMID, R., M. ROTHACHER, D. THALLER und P. STEIGENBERGER (2005): *Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas*, GPS Solutions, 9: 283-293.
- SCHMID, R., P. STEIGENBERGER, G. GENDT, M. GE und M. ROTHACHER (2007): *Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas*, Journal of Geodesy, 81(12): 781-798.
- SCHUH, H. (2000): *Contributions of VLBI to Space Geodesy*, In: R. RUMMEL, H. DREWES, W. BOSCH und H. HORNIG (Hrsg.), *Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS)*, 33-40, IAG Symposia 120, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- SCHÖDLBAUER, A. (2000): *Geodätische Astronomie: Grundlagen und Konzepte*, de Gruyter, Berlin.
- SCHÖN, S. und H. KUTTERER (2006): *A comparative analysis of uncertainty modelling in GPS data analysis*, In: TREGONING, P. und R. RIZOS (Hrsg.), *Dynamic Planet - Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools*, 137 - 142, IAG Symposia 130, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- SEEBER, G. (2003): *Satellite Geodesy*, de Gruyter, Berlin.
- SEIDELMANN, K. (1982): *1980 IAU Nutation: The Final Report of the IAU Working Group on Nutation*, Celestial Mechanics, 27: 79-106.
- SEIDELMANN, K. (1992): *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, University Science Books, Mill Valley, California.
- SEITZ, F. (2004): *Atmosphärische und ozeanische Einflüsse auf die Rotation der Erde*, Reihe C 578, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- SEITZ, F. und M. KRÜGEL (2009): *Modelling vertical site displacements due to surface loads in consideration of crustal inhomogeneities*, In: H. DREWES (Hrsg.), *Geodetic Reference Frames*, IAG Symposia 134, Springer, Berlin (im Druck).
- SIEG, D. und M. HIRSCH (2000): *Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätischen Netzen. Teil 2: Anwendungen*, Allgemeine Vermessungsnachrichten, 4: 122 - 137.
- SIGL, R. (1984): *The contribution of satellite geodesy to geosciences*, GeoJournal, 8: 6-19.
- SMITH, E. K. und S. WEINTRAUB (1953): *The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies*, In: *Proc. of the Institute of Radio Engineers*, 1035-1037.
- SNAJDROVA, K., J. BOEHM, P. WILLIS, R. HAAS und H. SCHUH (2005): *Multi-technique comparison of tropospheric zenith delays derived during the CONT02 campaign*, Journal of Geodesy, 97(10-11): 613-623.
- SOFFEL, M., J. SCHASTOK, H. RUDER und M. SCHNEIDER (1984): *Über die Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne*, Veröffentlichung der Bayrischen Akademie, Kommission für Internationale Erdmessung, Astronomisch-Geodätische Arbeiten 45.
- SOUCHAY, J., B. LOYSEL, H. KINOSHITA und M. FOLGUEIRA (1999): *Corrections and new developments in rigid Earth nutation theory. Final tables 'REN-200' including crossed-nutation and spin-orbit coupling effects*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 135: 111-131.
- SOVERS, O. J., J. L. FANSELOW und C. S. JACOBS (1998): *Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results*, Reviews of Modern Physics, 70: 1393 - 1454.
- SPRINGER, T. A. (1999): *Modelling and Validating Orbits and Clocks Using the Global Positioning System*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz 60, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich.
- STEIGENBERGER, P., I. ROMERO und P. FANG (2006(b)): *Reprocessing Issues, Standardization, New models*, Position Paper, IGS Workshop 2006, Darmstadt.
- STEIGENBERGER, P., M. ROTHACHER, M. FRITSCHKE, A. RÜLKE und S. VEY (2006(a)): *Reprocessing of a global GPS network*, Journal of Geophysical Research, 111(B05402).
- STEIGENBERGER, P., M. ROTHACHER, R. SCHMID, A. RÜLKE, M. FRITSCHKE, R. DIETRICH und V. TESMER (2008): *Effects of different antenna phase center models on GPS-derived reference frames*, In: H. DREWES und W. BOSCH (Hrsg.), *Geodetic Reference Frames*, IAG Symposia, Springer, Berlin (eingereicht).
- STEINFORTH, C., R. HAAS, M. LINDBERG und A. NOTHNAGEL (2003): *Stability of VLBI and GPS reference at Ny-Ålesund and Their Eccentricity*, In: SCHWEGMANN, W. und V. THORANDT (Hrsg.), *Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, May, 2003*, 83-89, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- TESMER, V., J. BOEHM, R. HEINKELMANN und H. SCHUH (2006): *Impact of Analysis Options on the TRF, CRF and Position Time Series Estimated from VLBI*, In: BEHREND, D. und K. D. BAVER (Hrsg.), *IVS 2006 General Meeting Proceedings*, 243-251, NASA/CP-2006-214140.
- TESMER, V., H. KUTTERER und H. DREWES (2004): *Simultaneous estimation of a TRF, the EOP and a CRF*, In: VANDENBERG N.R., B. K. E.

- (Hrsg.), *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings*, NASA/CP-2004-212255, Greenbelt MD, 311–314.
- THALLER, D. (2008): *Inter-technique combination based on homogeneous normal equation systems including station coordinates, Earth orientation and troposphere parameters*, Reihe C, Deutsche Geodätische Kommission, München (erscheint 2008).
- THALLER, D., R. DILL, M. KRÜGEL, P. STEINGENBERGER, M. ROTHACHER und V. TESMER (2006): *CONT02 Analysis and Combination of long EOP series*, In: FLURY, J., R. RUMMEL, C. REIGBER, M. ROTHACHER, G. BOEDECKER und U. SCHREIBER (Hrsg.), *Observation of the Earth System from Space*, 389–412, Springer, Berlin.
- THALLER, D., M. KRÜGEL, D. ANGERMANN, M. ROTHACHER, R. SCHMID und V. TESMER (2005): *Combination Studies Using the CONT02 Campaign*, In: BEHREND, D. und K. D. BAVER (Hrsg.), *IVS 2004 Annual Report*, Bd. NASA/TP-2005-212772, 13–21.
- THALLER, D., M. KRÜGEL, M. ROTHACHER, V. TESMER, R. SCHMID und D. ANGERMANN (2007): *Combined Earth orientation Parameters based on homogeneous and continuous VLBI and GPS data*, Journal of Geodesy.
- THAYER, G. D. (1974): *An improved equation for the radio refractive index of air*, Radio Science, 9(10): 803 – 807.
- THOMAS, C. und D. MACMILLAN (2003): *Core operation center report*, In: VANDENBERG, N. und K. BAVER (Hrsg.), *IVS 2002 Annual Report*, NASA, Greenbelt, MD.
- THOMAS, M., J. SÜNDERMANN und E. MAIERREIMER (2001): *Consideration of Ocean Tides in an OGCM and Impacts on Subseasonal to Decadal Polar Motion Excitation.*, Geophysical Research Letters, 28(12): 2457–2460.
- TITOV, O., V. TESMER und J. BÖHM (2001): *OC-CAM 5.0 Users Guide*, AUSLIG technical reports, 7: 311–314.
- TITOV, O., V. TESMER und J. BÖHM (2004): *OC-CAM v.6.0 software for VLBI data analysis*, In: VANDENBERG, N. R. und K. D. BAVER (Hrsg.), *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings*, 311–314, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
- TORGE, W. (2002): *Geodäsie*, Walter de Gruyter, Berlin – New York.
- TREGONING, P. und T. A. HERRING (2006): *Impact of a priori zenith hydrostatic delay errors on GPS estimates of station heights and zenith total delays*, Geophysical Research Letters, 33(L23303).
- URSCHL, C., W. GURTNER, U. HUGENTOBLE, S. SCHAER und G. BEUTLER (2005): *Contribution of SLR tracking data to GNSS orbit determination*, Advances in Space Research, 36(3): 412–417.
- VANDAM, T. M., G. BLEWITT und M. HEFLIN (1994): *Detection of atmospheric pressure loading using the Global Positioning System*, Journal of Geophysical Research, 99: 23,939–23,950.
- VANDAM, T. M. und J. M. WAHR (1987): *Deformations of the Earth's surface due to atmospheric loading, effects on gravity and baseline measurements*, Journal of Geophysical Research, 92: 1281–1286.
- VANDAM, T. M., J. M. WAHR, P. MILLY, A. SHMAKIN, G. BLEWITT, D. LAVALLEE und K. LARSON (2001): *Crustal displacement due to continental water loading*, Geophysical Research Letters, 28: 651–654.
- VOGEL, H. (1997): *Gerthsen Physik*, Springer, Berlin.
- WAHR, J. (1985): *Deformation induced by polar motion*, Journal of Geophysical Research, 90: 9363–9368.
- WANG, Z., Y. WU, K. ZHANG und Y. MENG (2005): *Triple-frequency method for high-order ionospheric refractive error modelling in GPS modernization*, Journal of Global Positioning System, 4(1-2): 291–295.
- WANNINGER, L. (1994): *Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover 201, Universität Hannover.
- WANNINGER, L. (2000): *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*, Habilitationsschrift, Technische Universität Dresden.
- WRESNIK, J., R. HAAS, J. BOEHM und H. SCHUH (2007): *Modeling thermal deformation of VLBI antennas with a new temperature model*, Journal of Geodesy, 81: 423–431(9).
- WÜBBENA, G., M. SCHMITZ und G. BOETTCHER (2003): *Analyse umfangreicher Messreihen von GPS-Antennen-PCV aus absoluten Roboterfeldkalibrierungen seit Januar 2000*, In: 5. GPS-Antennen-Workshop, Frankfurt am Main, 2003.
- XU, G. (2003): *GPS: Theory, Algorithms and Applications*, Springer, Berlin.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Schematische Darstellung eines VLBI-Experiments.	22
3.2	Prinzip der Laser-Entfernungsmessung	34
4.1	Geodätische Parameter der Raumberechnungsverfahren VLBI, SLR und GPS.	37
4.2	Vereinfachte Darstellung der Parametrisierung eines zeitabhängigen (oben) und eines zeitunabhängigen Referenzrahmens (unten) am Beispiel einer Stationsposition mit saisonaler Variation.	50
4.3	Schematische Darstellung des Kombinationsmodells für die Berechnung eines zeitabhängigen TRF. (* In dieser Arbeit stehen für SLR wöchentliche anstelle täglicher Normalgleichungen zur Verfügung.)	51
4.4	Schematische Darstellung des Kombinationsmodells zur Berechnung eines zeitunabhängigen TRF. (* In dieser Arbeit stehen für SLR nur wöchentliche anstelle täglicher Normalgleichungen zur Verfügung.)	56
5.1	Stationen des GPS-Netzes (blaue Punkte), des VLBI-Netzes (rote Dreiecke) und des SLR-Netzes (grüne Quadrate).	59
5.2	Konfiguration des Very Long Baseline Array (VLBA) während des in dieser Arbeit betrachteten Zeitraums.	61
5.3	Netzkonfiguration der VLBI-Kampagnen CONT02 und CONT05.	62
5.4	Übersicht der vorhandenen Ko-lokationsstationen. Europa ist im unteren Teil der Abbildung noch einmal vergrößert dargestellt.	65
5.5	Zeitreihen der Koordinaten des GPS-Massenschwerpunkts im IGS05 (tägliche Auflösung). Die WRMS-Werte sind ohne Berücksichtigung des Mittelwerts berechnet. Die Standardabweichungen der einzelnen Koordinaten liegen bei etwa 2-3 mm für die X- und Y-Komponente und bei 4-5 mm für die Z-Komponente. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen.	69
5.6	Zeitreihen der Koordinaten des SLR-Massenschwerpunkts im ITRF2005 (reskaliert) (wöchentliche Auflösung).	71
5.7	Zeitreihen der Nord-, Ost- und Höhenkomponente der Position der Station Macquarie Island (MAC1). (Blau: Zeitreihe vor dem Erdbeben, grün: Zeitreihe nach dem Erdbeben)	72
5.8	Vektordifferenz (dunkelgrau) und Streckendifferenz (hellgrau) zwischen den terrestrisch bestimmten und den aus den Raumberechnungsverfahren abgeleiteten Differenzvektoren für Ko-lokationen zwischen GPS- und VLBI-Stationen (oben) und GPS- und SLR-Stationen (unten); vergleiche auch Abbildung 5.9. Die Stationen sind mit den Namen der jeweiligen GPS-Station bezeichnet. Nur wenn sich zwei VLBI- oder SLR-Instrumente auf der Station befinden, sind zusätzlich deren Kennungen angegeben (siehe auch Tabelle 5.4). Die Tabelle in dieser Abbildung gibt eine Übersicht der Diskontinuitäten in den Zeitreihen der Ko-lokationsstationen.	74
5.9	Vektordifferenz (a) und Streckendifferenz (b) zwischen dem terrestrisch gemessenen und dem aus den Raumberechnungsverfahren bestimmten Differenzvektor.	75
5.10	Kombination von GPS und VLBI unter Verwendung verschiedener Differenzvektoren und a priori Standardabweichungen der Differenzvektoren: mittlere Differenz der Polkoordinaten (oben) und mittleres quadratisches Residuum der Transformation (unten).	75
5.11	Kombination von GPS und SLR unter Verwendung verschiedener Differenzvektoren und a priori Standardabweichungen der Differenzvektoren: mittlere Differenz der Polkoordinaten (oben) und mittleres quadratisches Residuum der Transformation (unten).	78
5.12	Diskrepanzen zwischen terrestrischen Differenzvektoren und den Koordinatendifferenzen der Raumberechnungsverfahren in Nordrichtung (hellgrün), Ostrichtung (dunkelgrün) und Höhenrichtung (grau) für GPS-VLBI-Ko-lokationen (oben) und GPS-SLR-Ko-lokationen (unten). Zu beachten sind die unterschiedlichen Achsskalierungen.	80
5.13	Wolkenbedeckung in Abhängigkeit vom Luftdruck für drei Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Insgesamt wurden etwa 6000 Luftdruckbeobachtungen je Station verwendet.	82
5.14	Zeitreihen des Luftdrucks für die SLR-Stationen Wettzell, Graz, Zimmerwald und Yarragadee aus ECMWF-Analysen (blau). Die SLR-Beobachtungsepochen sind durch rote Punkte gekennzeichnet.	83
5.15	Mittlere jährliche Wolkenbedeckung, die aus dem ICCP-D2 Projekt zur Verfügung gestellt wird, in Prozent. Die Kreise bezeichnen die geographische Lage der betrachteten SLR-Ko-lokationsstationen.	84

5.16	Luftdruckdifferenz $\bar{p} - \bar{p}_{\text{SLR}}$ in Abhängigkeit vom mittleren Luftdruck der Stationen. Stationen, die sich in einer Entfernung von mehr als 50 km zur Küste befinden, sind blau dargestellt. Stationen, die sich in einer Entfernung von weniger als 50 km zur Küste befinden, sind grau dargestellt.	86
5.17	Erdrotationsparameter abgeleitet aus VLBI (grün), SLR (grau), GPS (blau) und aus einer kombinierten Lösung (rot). Die Polkoordinaten und UT1-UTC sind relativ zu IERS EOP 05 C04 dargestellt. Die Nutationswinkel beziehen sich auf IAU2000.	88
5.18	Terrestrischer Pol und Abbildung der geschätzten Nutationsparameter in den terrestrischen Pol während eines Sterntages, dargestellt am Beispiel einer Polkoordinate und eines Nutationswinkels.	90
5.19	Zeitliche Variation der Korrelationen zwischen dem geschätzten Nutationswinkel $\Delta\psi$ (oben) beziehungsweise $\Delta\epsilon$ (unten) und der x-Komponente (links) beziehungsweise y-Komponente des terrestrischen Pols (rechts) zu Beginn (blau) und Ende eines Tages (rot) im Verlauf eines tropischen Jahres.	91
5.20	Korrelationen zwischen der Änderung des Nutationswinkels $\Delta\psi$ und des der x-Komponente des Pols, berechnet aus täglichen VLBI-Lösungen über ein Jahr.	91
5.21	Anzahl der verfügbaren terrestrischen Differenzvektoren je Session. Die Sessionen von September 2001 bis Oktober 2002 sind hell-, diejenigen von September 2004 bis Oktober 2005 dunkelgrau unterlegt. Die CONT-Kampagnen des IVS sind hervorgehoben.	94
5.22	Vergleich der terrestrisch bestimmten und der aus dem zeitabhängigen Referenzrahmen berechnete Differenzvektoren für die Nord-, Ost- und Höhenkomponente in [mm]. Die Abbildung d) zeigt die Vektordifferenz und die Streckendifferenz. Die roten Pfeile geben die Standardabweichungen an. Die Ko-lokationen sind durch den Namen der jeweils beteiligten GPS-Station gekennzeichnet. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen.	96
5.23	Vergleich der Lösungen, die unter Verwendung terrestrisch bestimmter Differenzvektoren (dunkelgrau) und berechneter Differenzvektoren (hellgrau) kombiniert wurden, hinsichtlich der mittleren Differenz des Pols (Poloffset), dem mittleren gewichteten Residuum der Transformationen (WRMS) der kombinierten Lösungen auf die VLBI-Lösungen und der Anzahl nicht gelöster Normalgleichungen.	97
5.24	Anteil der Tageskombinationslösungen, für deren Berechnung eine bestimmte Anzahl ausgewählter Differenzvektoren (DV) zur Verfügung stehen: (a) terrestrisch gemessene Differenzvektoren (b) berechnete Differenzvektoren. Der Grenzwert für die Auswahl der Differenzvektoren beträgt 20 mm.	98
5.25	Abhängigkeit der Standardabweichung der x-Komponente des Pols (VLBI) von der Anzahl der verwendeten Differenzvektoren je Tagesnormalgleichung. Die Rauten geben die mittleren Standardabweichungen an. Die gestrichelte Linie stellt eine ausgleichende Exponentialfunktion für diese Werte dar.	99
5.26	Tägliche Wiederholbarkeiten (in [mm], gewichtet) der Stationskoordinaten der Ko-lokationsstationen: GPS- beziehungsweise VLBI-Lösung (blau), Kombinationslösung basierend auf gerechneten Differenzvektoren, die mit einem Grenzwert von 20 mm ausgewählt wurden (grün). Die Namen der Stationen des VLBA-Netzes sind grau unterlegt.	101
5.27	Tägliche Wiederholbarkeiten (in [mm]) der Stationskoordinaten der VLBI-Ko-lokationsstationen, berechnet aus einem Zeitraum von zwei Monaten (grün) und aus den CONT-Kampagnen (weiß). Die Wiederholbarkeiten wurden unter Berücksichtigung der Standardabweichungen berechnet.	102
5.28	Zeitliche Variation der Stationshöhe für sechs ausgewählte Stationen. Die Zeitreihen resultieren aus täglichen GPS-Lösungen (grau), täglichen Kombinationslösungen (GPS (blau), VLBI (grün)) und Modellrechnungen mit wöchentlicher Auflösung (rot). Für VLBI-Stationen, die nur an wenigen Tagen beobachtet haben, sind die Positionen als Punkte dargestellt und nicht durch Linien verbunden.	104
5.29	Differenz der feuchten Laufzeitverzögerung ΔZWD (GPS - VLBI) berechnet aus der für die VLBI-Station gemessenen Temperatur T und dem Dampfdruck e für die Stationen (a) Wettzell ($\Delta h = 3$ m) und (b) Tsukuba ($\Delta h = 17.5$ m).	107
5.30	Abhängigkeit der Differenz ΔZWD zweier Stationen von der Änderung der Temperatur, der Änderung der Luftfeuchte und vom Höhenunterschied.	108
5.31	Aus GPS und VLBI geschätzte Troposphärenparameter sowie deren Differenzen für die Stationen Ny Ålesund und Algonquin Park. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen.	109
5.32	Differenzen zwischen Troposphärenparametern der GPS- und VLBI-Stationen auf Ko-lokationsstationen. Die Pfeile geben die aus der Streuung der Differenzzeitreihen berechnete (zweifache) Standardabweichung an (in der ersten Abbildung zur besseren Erkennbarkeit als Balken dargestellt). Die Stationen sind mit dem Namen der jeweiligen GPS-Station bezeichnet. Die Namen der Stationen auf denen die GPS-Antenne mit einem Radom betrieben wurde, sind grau unterlegt.	110

- 5.33 Änderung der täglichen Wiederholbarkeiten der VLBI-Stationskoordinaten einer Lösung mit kombinierter Laufzeitverzögerung (grün) und mit kombinierter Laufzeitverzögerung und kombinierten Gradienten (blau) gegenüber einer Referenzlösung ohne kombinierte Troposphärenparameter. Die Wiederholbarkeiten werden ohne Berücksichtigung der Standardabweichungen berechnet. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen. 113
- 5.34 Troposphärischer Ost-West-Gradient der Station Westford bestimmt aus GPS (blau) und VLBI (grün). . 114
- 5.35 Stündliche ZWD-Werte für die Station Wettzell geschätzt aus GPS- und VLBI-Beobachtungen (rot und grün) und berechnet aus WVR-Beobachtungen (blau). Die ZWD-Werte des WVR zu den ursprünglichen Beobachtungsepochen (grau) sind ebenfalls dargestellt. 116

Tabellenverzeichnis

5.1	Parametrisierung gemeinsamer Parameter von GPS, VLBI und SLR. Die Abbildung 4.1 gibt eine Übersicht, welche Parameter aus den Beobachtungen welcher Beobachtungsverfahren bestimmt werden können.	60
5.2	Stationen der CONT02-Kampagne des IVS.	63
5.3	Stationen der CONT05-Kampagne des IVS.	63
5.4	Ko-lokationen zwischen GPS und VLBI	64
5.5	Ko-lokationen zwischen GPS und SLR	66
5.6	Ko-lokationen zwischen VLBI und SLR	66
5.7	Geschätzte Skalierungsfaktoren zwischen der GPS-, SLR- und VLBI-Lösung und einem Referenzkoordinatensatz.	73
5.8	Bestimmung der Varianzkomponenten	73
5.9	Auswahl der terrestrischen Differenzvektoren für die Kombination GPS-VLBI (E: Epoche, zu welcher dieser Differenzvektor beobachtet wurde, ist bekannt). Für die Bezeichnung der Position der Stationen wird jeweils die Kurzbezeichnung und die Lösungsnummer angegeben. Die DOMES-Nummern können der Tabelle 5.4 entnommen werden.	76
5.10	Auswahl der terrestrischen Differenzvektoren für die Kombination GPS-SLR (E: Epoche, zu welcher dieser Differenzvektor beobachtet wurde, ist bekannt.) Für die Bezeichnung der Position der Stationen wird jeweils die Kurzbezeichnung und die Lösungsnummer angegeben. Die DOMES-Nummern können der Tabelle 5.5 entnommen werden.	77
5.11	Mittlere Differenzen der Polkoordinaten und mittlere quadratische Residuen der Transformation bei Einführung weiterer Differenzvektoren mit einem Grenzwert von 15.0 mm.	77
5.12	Anzahl der kombinierten Geschwindigkeiten.	78
5.13	Differenzen zwischen dem mittleren Luftdruck aller Epochen und dem mittleren Luftdruck der Beobachtungsepochen sowie die sich aus diesen Luftdruckdifferenzen ergebenden mittleren Höhenabweichungen der SLR-Stationen. Die Luftdruckdifferenzen sind signifikant bestimmt.	85
5.14	Transformationsparameter zwischen den Netzteilen der kombinierten Lösung und einem Referenzkoordinatensatz. Alle Transformationsparameter sind in [mm] beziehungsweise [mm/a] auf der Erdoberfläche angegeben.	86
5.15	Streuung der Erdrotationsparameter. Die Streuung der Polkoordinaten und UT1-UTC ist gegenüber IERS EOP 05 C04 angegeben, wobei die Zeitreihen zusätzlich um eine mittlere Differenz und eine zeitlich lineare Änderung gegenüber IERS EOP 05 C04 reduziert wurden. Die Streuung der Nutationsparameter ist in Bezug zum Nutationsmodell IAU2000 und einer geschätzten Sinusfunktion mit einer Periode von 432 Tagen angegeben. Für die Zeitreihen aus der kombinierten Lösung werden zwei Streuungswerte angegeben: (a) unter Berücksichtigung aller Parameter und (b) unter Berücksichtigung nur der Parameter, die zu gemeinsamen Epochen geschätzt wurden. Für die GPS- und die SLR-Lösung ist die Streuung bei Berücksichtigung aller Parameter oder nur der Parameter zu gemeinsamen Epochen jeweils fast identisch. Deshalb wird nur die Streuung angegeben, die aus der gesamten GPS- beziehungsweise SLR-Zeitreihe erhalten wird.	87
5.16	Mathematische Korrelationen zwischen gemeinsam geschätzten Nutationsparametern und Polkoordinaten.	92
5.17	Bestimmung der Varianzkomponenten für die tägliche Kombination.	94
5.18	Streuung der Erdrotationsparameter. Die Streuung der Polkoordinaten und UT1-UTC ist gegenüber IERS EOP 05 C04 angegeben, wobei die Zeitreihen zusätzlich um eine mittlere Differenz und eine zeitlich lineare Änderung gegenüber IERS EOP 05 C04 reduziert wurden. Die Streuung der Nutationsparameter ist in Bezug auf das Nutationsmodell IAU2000 und einer geschätzten Sinusfunktion mit einer Periode von 432 Tagen angegeben.	103
5.19	Korrelationen sowie die Streuung der Differenzen der Zeitreihen der Stationshöhen und modellierter Höhenvariationen für sechs ausgewählte Stationen. Es werden die kombinierten Zeitreihen verwendet sowie die Zeitreihen, die aus den GPS-Lösungen resultieren.	105
5.20	Mögliche Ursachen großer Differenzen zwischen der troposphärischen Laufzeitverzögerung und den troposphärischen Gradienten. Für die übrigen, in der Tabelle nicht enthaltenen Stationen ist der maximale Höhenunterschied $\Delta h \approx 24$ m, die maximale ellipsoidische Höhe $h \approx 1600$ m und der maximale geschätzte ZPD ≈ 180 mm.	111

5.21	Ko-lokationen mit großen Diskrepanzen zwischen den aus GPS und VLBI geschätzten Troposphärenparametern. Die betreffenden Parameter werden nicht kombiniert.	112
5.22	Differenzen zwischen den aus den Raumberechnungsverfahren berechneten und den terrestrisch gemessenen Differenzvektoren für die Beobachtungen der CONT05-Kampagne.	114
5.23	Mittlere Differenzen zwischen ZWD-Werten aus GPS, VLBI und WVR sowie die (gewichtete) Streuung der Differenzzeitreihen.	117
5.24	Vergleich des zeitabhängigen und des zeitunabhängigen Referenzrahmens.	119
1	Verwendete Modelle für die GPS-, VLBI- und SLR-Auswertung.	144
2	Diskontinuitäten der GPS-Stationspositionszeitreihen	146
3	GPS-Referenzstationen: Zuordnung zum IGS05	148
4	Tägliche Wiederholbarkeiten der Komponenten der GPS-Stationspositionen (gewichtete Transformation, gewichteter RMS) für Referenz- und Ko-lokationsstationen.	150
5	VLBI-Referenzstationen: Zuordnung zum ITRF2005	152
6	Tägliche Wiederholbarkeiten der Komponenten der VLBI-Stationspositionen (gewichtete Transformation, gewichteter RMS)	153
7	Diskontinuitäten der SLR-Stationspositionszeitreihen	153
8	SLR-Referenzstationen: Zuordnung zum ITRF2005	154
9	Wöchentliche Wiederholbarkeiten der Komponenten der SLR-Stationspositionen (gewichtete Transformation, gewichteter RMS).	155
10	Verwendete Differenzvektoren zwischen GPS- und VLBI-Stationen. Wenn keine Referenzepeche für den Differenzvektor angegeben ist, ist diese nicht bekannt.	156
11	Verwendete Differenzvektoren zwischen GPS- und SLR-Stationen. Wenn keine Referenzepeche für den Differenzvektor angegeben ist, ist diese nicht bekannt.	157
12	Verwendete Differenzvektoren zwischen VLBI- und SLR-Stationen. Wenn keine Referenzepeche für den Differenzvektor angegeben ist, ist diese nicht bekannt.	158
13	Antennen und Empfänger auf den GPS-Ko-lokationsstationen.	159
14	Antennen der VLBI-Ko-lokationsstationen.	160
15	Empfangseinheiten der SLR-Ko-lokationsstationen (entnommen aus den site logs <i>auf der Webseite des ILRS</i> http://ilrs.gsfc.nasa.gov/stations (13.02.2008)).	161
16	Differenzen zwischen terrestrisch gemessenen und aus den Raumberechnungsverfahren berechneten Differenzvektoren für Ko-lokationen zwischen GPS und VLBI. Die angegebenen Standardabweichungen sind aus den täglichen Wiederholbarkeiten der Stationskoordinaten berechnet und geben nur die Genauigkeit der gerechneten Differenzvektoren an.	162
17	Höhendifferenzen auf Ko-lokationsstationen	163

Abkürzungsverzeichnis

AIUB	Astronomisches Institut der Universität Bern
APKIM	Actual Plate Kinematic and Deformation Model
BIH	Bureau International de l'Heure
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CDAS	Climate Data Assimilation System
CEO	Celestial Ephemeris Origin
CEP	Celestial Ephemeris Pole
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload
CIO	Celestial International Origin
CIP	Celestial Intermediate Pole
CTP	Conventional Terrestrial Pole
DOGS-CS	DGFI Orbit and Geodetic Parameter Estimation Software - Combination Software
DORIS	Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite
ECCO	Estimating the Circulation and the Climate of the Ocean
ECHAM	ECMWF-Hamburg
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EGM	Earth Gravity Model
EIGEN	European Improved Gravity Model of the Earth by New Techniques
ENSO	El Niño Southern Oscillation
EOP	Erdorientierungsparameter
ERP	Erdrotationsparameter
ESEAS	European Sea Level Service
EUREF	European Terrestrial Reference Frame
FCN	free core nutation
FGS	Forschungsgruppe Satellitengeodäsie
GAST	Greenwich Apparent Sideral Time
GEOSS	Global Earth Observing System of Systems
GFZ	GeoForschungszentrum Potsdam
GGOS	Global Geodetic Observing System
GLDAS	Global Land Data Assimilation System
GM	geozentrische Gravitationskonstante
GMM	Gauß-Markoff-Modell
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
IAG	Internationale Assoziation für Geodäsie
IAU	Internationale Astronomische Union
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGS	International GNSS Service
ILRS	International Laser Ranging Service
IRM	IERS Reference Meridian
IRP	IERS Reference Pole
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
LAD	Land dynamics soil hydrology model
LLR	Lunar Laser Ranging
LOD	Length of day
NCEP/NCAR	National Centers for Environmental Prediction /National Centers for Atmospheric Research
NNR	no-net-rotation
NNT	no-net-translation
NRAO	National Radio Astronomy Observatory

OMCT	Ocean Model for Circulation and Tides
PREM	Preliminary Reference Earth Model
Quasar	quasi-stellar radio source
RMS	Root Mean Square
SAR	Synthetic-aperture radar
SBL	Special Bureau for Loading
SINEX	Software Independent Exchange
SLR	Satellite Laser Ranging
SNREI	spherical non-rotating, elastic, isotropic
TAI	Temps Atomique International
TCG	Geocentric Coordinate Time
TEC	Total Electron Content
TT	Terrestrial Time
UT	Universal Time
UTC	Universal Time Coordinated
VLBA	Very Long Baseline Array
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WGHM	WaterGAP Global Hydrology Model
WRMS	Weighted Root Mean Square
WVR	Water Vapor Radiometer
ZPD	zenith path delay
ZWD	zenith wet delay

Lebenslauf

25.11.1977 geboren in Zwickau

Ausbildung

1984 - 1990 Polytechnische Oberschule Ernst Beyer in Vielau
 1990 - 1992 Leistungsklasse für Mathematik und Naturwissenschaften an der Ditteschule in Wilkau-Haßlau
 1992 - 1996 Gymnasium am Sandberg in Wilkau-Haßlau
 Abschluss: allgemeine Hochschulreife (Abitur), Juni 1996
 1996 - 2001 Studium der Geodäsie an der Technischen Universität Dresden
 Abschluss: Diplom, Oktober 2001

Beruflicher Werdegang

1998-2001 Studentische Hilfskraft am Institut für Planetare Geodäsie der Technischen Universität Dresden
 seit November 2001 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI) bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München

Dank

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard Dietrich, der sich nach dem Abschluß meines Studiums an der TU Dresden trotz der großen Entfernung nach München bereit erklärt hat, meine Promotion zu betreuen und mich in jeder Hinsicht unterstützt hat. So konnte ich mehrmals für längere Zeit am Institut für Planetare Geodäsie der TU Dresden sein, um dort durch Diskussionen mit den Dresdner Kollegen jedes Mal einen wichtigen Schritt in meiner Arbeit voranzukommen. Hier sei ganz besonders Axel Rülke und Mathias Fritsche sehr herzlich gedankt.

Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Drewes, dem Direktor des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI) danke ich von Herzen für die gute Betreuung der Arbeit, für seine Unterstützung und die hilfreichen, oftmals leidenschaftlichen Diskussionen. Ihm danke ich außerdem für seinen Einsatz, durch den finanzielle Engpässe überbrückt werden konnten. Weiterhin gilt ihm mein Dank dafür, dass ich eines der drei ITRS Combination Centres des IERS, das am DGFI beheimatet ist, mit aufbauen durfte und dadurch sowie durch Teilnahmen an internationalen Tagungen regen Austausch mit den Kollegen aus aller Welt pflegen konnte. Dadurch wurde meine Arbeit stark beeinflusst und gefördert.

Dem Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Lambert Wanninger danke ich sehr herzlich für die Übernahme des dritten Gutachtens.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut. Meinen Kollegen am DGFI möchte ich ganz herzlich danken, da sie mich bei der Bearbeitung des Themas unterstützt und durch viele konstruktive Diskussionen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Ganz besonders danken möchte ich meiner Projektmitstreiterin Barbara Meisel. Die vielen gemeinsamen Untersuchungen und Diskussionen, haben meine Arbeit sehr beeinflusst und vorangebracht. Ebenso danke ich Dr.-Ing. Detlef Angermann für seine Unterstützung und das Korrekturlesen der Arbeit sowie Dr.-Ing. Volker Tesmer, der mir besonders in den Fragen rund um das VLBI-Verfahren eine große Hilfe war. PD Dr.-Ing. Michael Schmidt danke ich für das Korrekturlesen der mathematischen Kapitel meiner Arbeit.

Sehr herzlich danke ich auch Frau Dr.-Ing. Daniela Thaller. Ihre Freude an unseren Projekten und ihre große Hilfsbereitschaft haben unsere Zusammenarbeit zu einer sehr schönen und fruchtbaren Zeit werden lassen, während der wir gute Freunde geworden sind. Ich hoffe sehr, dass wir auch in Zukunft wieder gemeinsame Arbeiten in Angriff nehmen können.

Ich danke außerdem der gesamten GGOS-D-Projektgruppe. Die gute Zusammenarbeit in dieser Gruppe hat entscheidend zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Hier gilt mein Dank besonders für die Bereitstellung der Daten, die ich für meine Arbeit verwenden durfte und natürlich für das rege Interesse an den Ergebnissen und die guten Diskussionen. An dieser Stelle möchte ich auch Frau Dr. phil.-nat. Claudia Flohrer sowie Dr.-Ing. Ralf Schmid für ihre Unterstützung bei Fragen zur GPS-Auswertung danken.

Ich danke von Herzen meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich immer unterstützt und mir Mut gemacht haben. Ganz besonders danke ich meinem lieben Mann für seine Unterstützung und sein Verständnis ganz besonders während der letzten Wochen, in denen ich meine Dissertation fertiggestellt habe.

Anhang

Tabelle 1: Verwendete Modelle für die GPS-, VLBI- und SLR-Auswertung.

Parameter	Modell	relevantes Kapitel in dieser Arbeit
Stationskoordinaten		
Gezeitendeformation des Erdkörpers	IERS-Konventionen (MCCARTHY und PETIT 2004)	2.4.2
Permanente Tide	wird für die Stationskoordinaten nicht berücksichtigt	2.4.2
Ozeangezeiten	FES2004 (LEFEVRE <i>et al.</i> 2002)	
Ozeangezeitenbedingte Auflast	FES2004 (LEFEVRE <i>et al.</i> 2002)	2.4.4
Polgezeiten	linearer Trend für mittlere Poloffsets entsprechend Konventionen des IERS (MCCARTHY und PETIT 2004)	2.4.3
Atmosphärenauflast	wird nicht berücksichtigt	2.4.4
Erdorientierungsparameter		
Näherungswerte	tägliche Werte der IERS EOP 05 C04-Serie (Polkoordinaten, UT1-UTC)	
Interpolation der a priori Werte	Die Interpolation der Polkoordinaten erfolgt linear. UT1-UTC wird zunächst durch Abziehen von Perioden unter 35 Tagen auf UT1R reduziert. UT1R wird linear interpoliert und anschließend durch Umkehren der Reduktion wieder in UT1-UTC umgerechnet.	
Modellierung der subtäglichen EOP	entsprechend den IERS Konventionen (MCCARTHY und PETIT 2004)	
Näherungswerte der Nutationsparameter	IAU2000A-Modell (MCCARTHY und PETIT 2004) (ohne Berücksichtigung der <i>free core nutation</i>)	
subtägliche Nutationsterme	werden nicht angebracht	
Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung für Radiowellen		
Zenitdelay Näherungswerte (entsprechen in etwa dem trockenen Anteil)	Modell von Saastamoinen (1973) und Formeln von Berg zur Berechnung der Höhenabhängigkeit der Standardatmosphäre in bodennahen Luftschichten	3.1.2.1
Übertragungsfunktion für die a priori Werte	Dry Niell (NIELL 1996)	3.1.2.1
Übertragungsfunktion für den geschätzten Anteil	Wet Niell (NIELL 1996)	3.1.2.1
Gradienten Näherungswerte	sind Null	
Übertragungsfunktion für Gradienten	für VLBI entsprechend MACMILLAN (1995) für GPS entsprechend DACH <i>et al.</i> (2007)	3.1.2.1

Fortsetzung auf der folgenden Seite

<i>Fortsetzung der vorherigen Seite</i>		
Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung für optische Beobachtungsverfahren		
Troposphärenmodell	MENDES und PAVLIS (2004) (Aktualisierung der Konventionen des IERS (MCCARTHY und PETIT 2004) siehe unter http://tai.bipm.org/iers/convupdt/convupdt_c9.html , 21.01.2008)	3.3.2.2
Modellierung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung		
Effekte zweiter und dritter Ordnung	werden nicht berücksichtigt	3.1.2.1
Modellierung relativistischer Effekte		
	entsprechend den IERS Konventionen (MCCARTHY und PETIT 2004)	3.1.2.3, 3.2.2.5
Modellierung technikspezifischer Effekte bei VLBI		
Thermale Deformation	wird nicht berücksichtigt	3.1.2.2
Modellierung technikspezifischer Effekte bei SLR		
Reflektorzentren (<i>center of mass corrections</i>)	entsprechend den ILRS Bestimmungen (http://ilrs.gsfc.nasa.gov/stellite_missions/center_of_mass/index.html , 09.07.2007)	3.3.2.1
<i>range bias</i>	entsprechend den ILRS Bestimmungen	3.3.2.4
Länge des Bahnbogens	7 Tage	
Modellierung technikspezifischer Effekte bei GPS		
Phasenzentrumskorrekturen für Boden- und Satellitenantennen	ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/pcv_proposed/igs_05.atx (IGSMail 5187)	3.2.2.3
Radomkalibrierungen	ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/pcv_proposed/igs_05.atx (IGSMail 5187)	3.2.2.3
Antennenhöhen	entsprechend der Datei <i>igs.snz</i> (ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general) und den Emails des IGS (ftp://igsb.jpl.nasa.gov/pub/mail/igsstation , 09.07.2007)	
horizontale Antennenexzentrizitäten	werden entsprechend den Angaben in den <i>log files</i> der Stationen (ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/log/) angebracht	

Tabelle 2: Diskontinuitäten der GPS-Stationspositionsreihen

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung	Epoche	Ursache	Quelle
Grasse	10002M006 GRAS	23.04.2003	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
Toulouse	10003M009 TLSE	01.12.2003	Antennen-Wechsel	logfile
Hofn	10204M002 HOFN	21.09.2001	Antennen-Wechsel	logfile
Tromsø	10302M006 TR01	13.07.2004	Antennen-Wechsel	IGSSTATION-123 ¹
Penc	11206M006 PENC	22.05.2003	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
Jozefoslaw-Warsaw	12204M001 JOZE	06.12.2004	unbekannt	
Yuzhno-Sakhalinsk	12329M003 YSSK	25.09.2003	Hokkaido-Erdbeben (Mw 8.3)	
Magadan	12354M001 MAGO	13.10.2002	unbekannt	
	12354M001 MAGO	02.11.2003	Hokkaido-Erdbeben (Mw 8.3)	
Petropavlovsk	12355M002 PETP	15.01.2005	unbekannt	
Bilibino	12363M001 BILI	15.01.2002	unbekannt	
	12363M001 BILI	03.03.2002	unbekannt	
San Fernando	13402M004 SFER	05.03.2002	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
	13402M004 SFER	08.06.2003	unbekannt	
Villafranca	13406M001 VILL	28.09.2004	Antennen-Wechsel	logfile
Kootwijk	13504M003 KOSG	18.03.2003	unbekannt	
Mitzpe Ramon	20703S001 RAMO	19.03.2004	unbekannt	
Wuhan	21602M001 WUHN	26.01.2002	Antennenhöhe	logfile
Kunming	21609M001 KUNM	26.12.2004	Erdbeben im Indischen Ozean (Mw 9.0)	
Usuda	21729S007 USUD	05.09.2004	unbekannt	
Quezon	22003M001 PIMO	26.12.2004	Erdbeben im Indischen Ozean (Mw 9.0)	
Bangalore	22306M002 IISC	26.12.2004	Erdbeben im Indischen Ozean (Mw 9.0)	
Singapore	22601M001 NTUS	26.12.2004	Erdbeben im Indischen Ozean (Mw 9.0)	
Cibinong	23101M002 BAKO	07.09.2001	unbekannt	
	23101M002 BAKO	06.10.2001	Antennen-Wechsel	logfile
Gough Island	30608M001 GOUG	20.10.2004	unbekannt	
Diego Garcia	30802M001 DGAR	26.12.2004	Erdbeben im Indischen Ozean (Mw 9.0)	
Churchill	40128M002 CHUR	11.01.2005	Antennen-Wechsel	logfile
Victoria/ Sidney	40129M003 ALBH	08.09.2003	Radome-Wechsel	logfile
Schefferville	40133M002 SCH2	28.02.2002	unbekannt	
Whitehorse	40136M001 WHIT	12.01.2002	unbekannt	
Lac Du Bonnet	40137M001 DUBO	13.10.2002	unbekannt	
Nanoose	40138M001 NANO	09.01.2003	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
Fairbanks	40408M001 FAIR	03.11.2002	Erdbeben an der Denali-Störung	
Kokee Park	40424M004 KOKB	14.10.2002	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
	40424M004 KOKB	18.05.2004	Antennen-Wechsel	logfile

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Fortsetzung der vorherigen Seite

Colorado Springs	40472S004 AMC2	14.06.2002	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
	40472S004 AMC2	15.10.2002	unbekannt	
Managua	41201S001 MANA	11.10.2004	unbekannt	
Bermuda	42501S004 BRMU	12.03.2003	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
Bermuda	42501S004 BRMU	02.07.2004	unbekannt	
Kellyville	43005M001 KELY	14.09.2001	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
Qaqortoq	43007M001 QAQ1	30.12.2003	Antennen-Wechsel	logfile
Hobart	50116M004 HOB2	23.12.2004	Erdbeben in der Region der Macquarie-Inseln (Mw 8.1)	
Perth	50133M001 PERT	05.06.2003	Antennen-Wechsel	logfile
Darwin	50134M001 DARW	19.10.2001	Antennen-Wechsel	IGSMail-3562 ²
Darwin	50134M001 DARW	14.12.2001	Antennen-Wechsel	IGSMail-3649 ²
Macquarie Island	50135M001 MAC1	23.12.2004	Erdbeben in der Region der Macquarie-Inseln (Mw 8.1)	
Jabiru	50136M001 JAB1	04.03.2003	Antennen/Empfänger-Wechsel	logfile
Cedua	50138M001 CEDU	22.04.2004	unbekannt	
Guam	50501M002 GUAM	26.04.2002	Erdbeben in der Region der Macquarie-Inseln (Mw 7.1)	
Mc Murdo	66001M003 MCM4	03.01.2002	Empfänger-Wechsel	logfile

¹ IGSSTATION ist ein Email-Service des IGS.

² IGSMail ist ein Email-Service des IGS.

Tabelle 3: GPS-Referenzstationen: Zuordnung zum IGS05

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung	Lösungsnummer	Lösungsnummer im IGS05	Beobachtungszeitraum im IGS05
Grasse	10002M006 GRAS (a)	A1	A3	von 21.10.04 bis 01.01.06
Grasse	10002M006 GRAS (a)	A1	A3	von 21.10.04 bis 01.01.06
Reykjavik	10202M001 REYK	A1	A3	von 21.06.00 bis 01.01.06
Hofn	10204M002 HOFN	A2	A2	von 21.09.01 bis 01.01.06
Tromsø	10302M003 TROM	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
	10302M006 TR01 (a)	A1	A4	von 13.07.04 bis 01.01.06
Ny Ålesund	10317M001 NYAL (b)	A1	A3	von 19.07.03 bis 01.01.06
	10317M003 NYA1 (b)	A1	A2	von 19.07.03 bis 01.01.06
Onsala	10402M004 ONSA	A1	A3	von 02.02.99 bis 01.01.06
Metsahovie	10503S011 METS	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Jozefoslaw-Warsaw	12204M001 JOZE	A1	A2	von 06.12.04 bis 01.01.06
Borowiec	12205M002 BOR1	A1	A2	von 31.05.99 bis 01.01.06
Irkutsk	12313M001 IRKT	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Yuzhno-Sakhalins	12329M003 YSSK (a)	A1	A2	von 25.09.03 bis 01.01.06
Kitab	12334M001 KIT3	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Poligan/Bishkek	12348M001 POL2	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Petropavlovsk	12355M002 PETP	A1	A3	von 23.01.05 bis 01.01.06
Golosiiv-Kiev	12356M001 GLSV	A1	A1	von 16.12.97 bis 01.01.06
Tixi	12360M001 TIXI	A1	A1	von 08.10.98 bis 01.01.06
Arti	12362M001 ARTU	A1	A3	von 02.02.00 bis 01.01.06
Bilibino	12363M001 BILI	A3	A4	von 02.11.03 bis 01.01.06
Noto	12717M004 NOT1	A1	A1	von 15.09.00 bis 01.01.06
Cagliari	12725M003 CAGL	A1	A3	von 11.07.01 bis 01.01.06
Matera	12734M008 MATE	A1	A4	von 18.06.99 bis 01.01.06
Brussels	13101M004 BRUS	A1	A2	von 27.04.00 bis 01.01.06
San Fernando	13402M004 SFER (a)	A2	A5	von 08.06.03 bis 01.01.06
Villafranca	13406M001 VILL (a)	A1	A5	von 28.09.04 bis 01.01.06
Madrid	13407S012 MADR	A1	A9	von 30.06.00 bis 01.01.06
Westerbork	13506M005 WSRT	A1	A1	von 01.06.97 bis 01.01.06
Zimmerwald	14001M004 ZIMM	A1	A2	von 06.11.98 bis 01.01.06
Potsdam	14106M003 POTS	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Wetzell	14201M010 WTZR	A1	A3	von 01.09.96 bis 01.01.06
Nicosia-Athalassa	14302M001 NICO	A1	A2	von 21.08.99 bis 01.01.06
Mitzpe-Ramon	20703S001 RAMO (a)	A1	A3	von 17.03.04 bis 01.01.06
Trabzon	20808M001 TRAB	A1	A1	von 08.12.99 bis 01.01.06
Beijing	21601M001 BJFS	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Wuhan	21602M001 WUHN (b)	A2	A4	von 31.10.02 bis 01.01.06
Kunming	21609M001 KUNM	A1	A2	von 26.12.04 bis 01.01.06
Tsukuba	21730S005 TSKB	A1	A2	von 21.01.96 bis 01.01.06
Quezon	22003M001 PIMO	A1	A3	von 26.12.04 bis 01.01.06
Bangalore	22306M002 IISC (b)	A1	B2	von 26.12.04 bis 01.01.06
Taejon	23902M002 DAEJ	A1	A1	von 19.03.99 bis 01.01.06
Bahrein	24901M002 BAHR	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Hartebeesthoek	30302M004 HRAO	A1	A1	von 05.09.96 bis 01.01.06
Sutherland	30314M002 SUTH	A1	A1	von 05.12.97 bis 01.01.06
Ascension	30602M001 ASC1 (a)	A1	A1	von 20.04.96 bis 01.01.06
Diego Garcia	30802M001 DGAR (a)	A1	A2	von 26.12.04 bis 01.01.06
Maspalomas	31303M002 MAS1	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Ponta Delgada	31906M004 PDEL	A1	A1	von 16.01.00 bis 01.01.06
Libreville	32809M002 NKLG	A1	A1	von 10.02.00 bis 01.01.06
Malindi	33201M001 MALI	A1	A2	von 23.10.97 bis 01.01.06
Mahe Island	39801M001 SEY1 (c)	A1	A2	von 14.01.97 bis 01.01.06
Saint John's	40101M001 STJO	A1	A4	von 21.01.96 bis 01.01.06
Algonquin Park	40104M002 ALGO	A1	A7	von 01.03.98 bis 01.01.06
Penticton	40105M002 DRAO (b)	A1	A3	von 21.01.96 bis 01.01.06

Fortsetzung auf der folgenden Seite

<i>Fortsetzung der vorherigen Seite</i>					
Ottawa	40114M001	NRC1	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Yellowknife	40127M003	YELL	A1	A5	von 09.03.01 bis 01.01.06
Churchill	40128M002	CHUR	A1	A4	von 03.02.05 bis 01.01.06
Schefferville	40133M002	SCH2	A1	A1	von 29.06.97 bis 01.01.06
Williams Lake	40134M001	WILL	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Flin Flon	40135M001	FLIN	A1	A2	von 07.01.97 bis 01.01.06
Whitehorse	40136M001	WHIT	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Lac du Bonnet	40137M001	DUBO (a)	A2	A4	von 04.01.04 bis 01.01.06
Goldstone	40405S031	GOLD	A1	A7	von 24.11.03 bis 01.01.06
Kokee Park	40424M004	KOKB (a)	A3	A5	von 18.05.04 bis 01.01.06
Quincy	40433M004	QUIN	A1	A3	von 01.04.98 bis 01.01.06
Westford	40440S020	WES2	A1	A9	von 08.02.04 bis 01.01.06
Fort Davis	40442M012	MDO1	A1	A3	von 07.12.04 bis 01.01.06
Washington	40451M123	GODE	A1	A2	von 01.03.98 bis 01.01.06
	40451S003	USNO	A1	A1	von 24.04.97 bis 01.01.06
Pie Town	40456M001	PIE1	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
North Liberty	40465M001	NLIB	A1	A2	von 15.04.05 bis 01.01.06
Colorado Springs	40472S004	AMC2 (a)	A3	A4	von 15.10.02 bis 01.01.06
Mauna Kea	40477M001	MKEA	A1	A1	von 08.08.96 bis 01.01.06
Santiago de Cuba	40701M001	SCUB	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Managua	41201S001	MANA (a)	A1	A2	von 10.10.04 bis 01.01.06
Rio Grande	41507M004	RIOG	A1	A1	von 12.11.96 bis 01.01.06
La Plata	41510M001	LPGS	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Salta	41514M001	UNSA	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Brasilia	41606M001	BRAZ	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Easter Island	41703M007	ISPA (a)	A1	A1	von 13.02.04 bis 01.01.06
Santiago	41705M003	SANT	A1	A3	von 02.11.98 bis 01.01.06
Conzeption	41719M002	CONZ	A1	A2	von 17.05.05 bis 01.01.06
Santa Cruz	42005M002	GLPS (a)	A1	A1	von 08.03.02 bis 01.01.06
Thule	43001M002	THU3	A1	A1	von 17.11.00 bis 01.01.06
Qaqortoq	43007M001	QAQ1 (a)	A1	A3	von 30.12.03 bis 01.01.06
Saint Croix	43201M001	CRO1 (a)	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Tidbinbilla	50103M108	TIDB	A1	A2	von 26.06.96 bis 01.01.06
Yarragadee	50107M004	YAR1	A1	A2	von 01.03.98 bis 01.01.06
Hobart	50116M004	HOB2	A1	A2	von 23.12.04 bis 01.01.06
Coco Islands	50127M001	COCO	A1	A3	von 26.12.04 bis 01.01.06
Perth	50133M001	PERT (a)	A1	A4	von 05.06.03 bis 01.01.06
Darwin	50134M001	DARW	A3	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Macquarie Islands	50135M001	MAC1 (b)	A1	A4	von 23.12.04 bis 01.01.06
Jabiru	50136M001	JAB1 (b)	A1	A2	von 04.03.03 bis 01.01.06
Alice Springs	50137M001	ALIC	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Cedua	50138M001	CEDU (a)	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Karratha	50139M001	KARR	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Townsvillage	50140M001	TOW2	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Chatam Islands	50207M001	CHAT	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Guam	50501M002	GUAM	A2	A4	von 26.04.02 bis 01.01.06
Mc Murdo	66001M003	MCM4	A2	A3	von 03.01.02 bis 01.01.06
Mawson Station	66004M001	MAW1	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
O'Higgins	66008M005	OHI2 (c)	A1	A1	von 14.02.02 bis 01.01.06
Sanae	66009M001	VESL	A1	A1	von 18.12.97 bis 01.01.06
Davis	66010M001	DAV1 (b)	A1	A1	von 21.01.96 bis 01.01.06
Casey	66011M001	CAS1	A1	A3	von 09.11.97 bis 01.01.06
Kerguelen	91201M002	KERG	A1	A2	von 12.09.97 bis 01.01.06
Thaiti	92201M009	THTI	A1	A1	von 22.11.98 bis 01.01.06
Noumea	92701M003	NOUM	A1	A1	von 08.12.97 bis 01.01.06

Stationen, die mit (a) oder (b) gekennzeichnet sind, wurden nicht als Referenzstationen verwendet, weil: (a) sie nur in einem der Jahre beobachtet oder in einem der beiden Jahre nur sehr kurz beobachtet haben, (b) die Residuen der Transformation der zeitabhängigen GPS-Lösung auf IGS05 10 mm für eine der Positionskomponenten oder 5 mm/a für Geschwindigkeiteskomponenten übersteigen oder (c) ihre Zeitreihen einen WRMS gegenüber der zeitabhängigen Lösung von größer als 7 mm für eine der Lage- und/oder 15 mm für die Höhenkopponente aufweisen.

Tabelle 4: Tägliche Wiederholbarkeiten der Komponenten der GPS-Stationspositionen (gewichtete Transformation, gewichteter RMS) für Referenz- und Ko-lokationsstationen.

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung	Lösungsnummer	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
Reykjavik	10202M001 REYK	A1	1.72	1.67	5.99
Hofn	10204M002 HOFN	A2	1.71	1.78	6.46
Tromsø	10302M003 TROM	A1	2.28	1.78	5.57
Ny Ålesund	10317M001 NYAL	A1	1.67	1.22	7.82
	10317M003 NYA1	A1	1.75	1.48	7.70
Onsala	10402M004 ONSA	A1	1.65	1.00	4.30
Metsahovie	10503S011 METS	A1	1.79	1.06	5.25
Jozefoslaw-Warsaw	12204M001 JOZE	A1	1.72	1.16	5.15
Borowiec	12205M002 BOR1	A1	1.64	1.01	4.34
Irkutsk	12313M001 IRKT	A1	3.29	2.03	12.35
Kitab	12334M001 KIT3	A1	2.46	3.24	6.92
Poligan/Bishkek	12348M001 POL2	A1	2.64	2.28	5.50
Petropavlovsk	12355M002 PETP	A1	2.96	2.17	5.75
Svetloe	12350M001 SVTL	A1	0.66	0.54	2.78
Golosiiv-Kiev	12356M001 GLSV	A1	1.92	1.80	7.19
Tixi	12360M001 TIXI	A1	2.53	1.54	7.38
Arti	12362M001 ARTU	A1	2.21	2.30	7.10
Bilibino	12363M001 BILI	A3	2.66	1.82	6.94
Medicina	12711M003 MEDI	A1	2.04	2.39	4.79
Noto	12717M004 NOT1	A1	2.09	1.70	5.62
Cagliari	12725M003 CAGL	A1	1.76	1.86	5.27
Matera	12734M008 MATE	A1	1.65	1.14	4.35
Brussels	13101M004 BRUS	A1	1.65	0.93	4.00
Madrid	13407S012 MADR	A1	2.38	1.39	5.50
Yebes	13420M001 YEBE	A1	1.74	1.19	4.12
Westerbork	13506M005 WSRT	A1	1.63	0.87	5.79
Zimmerwald	14001M004 ZIMM	A1	1.65	0.93	4.00
Potsdam	14106M003 POTS	A1	1.64	0.78	4.55
Wetzell	14201M010 WTZR	A1	1.72	1.05	4.65
Nicosia-Athalassa	14302M001 NICO	A1	2.19	1.78	5.23
Trabzon	20808M001 TRAB	A1	1.93	1.64	6.31
Beijing	21601M001 BJFS	A1	2.51	1.82	7.05
Shanghai	21605M002 SHAO	A1	3.53	2.51	7.90
Kunming	21609M001 KUNM	A1	2.83	2.55	11.256
Urumqui	21612M001 URUM	A1	2.75	3.03	8.92
Tsukuba	21730S005 TSKB	A1	2.91	2.16	9.28
Quezon	22003M001 PIMO	A1	2.69	2.87	11.59
Taejon	23902M002 DAEJ	A1	2.47	2.17	6.34
Bahrein	24901M002 BAHR	A1	2.44	2.44	8.47
Hartebeesthoek	30302M004 HRAO	A1	2.98	2.36	7.27
Sutherland	30314M002 SUTH	A1	2.56	2.35	5.96
Maspalomas	31303M002 MAS1	A1	1.89	1.98	6.49
Ponta Delgada	31906M004 PDEL	A1	2.03	1.96	6.17
Libreville	32809M002 NKLG	A1	2.65	2.63	7.67
Malindi	33201M001 MALI	A1	2.79	2.72	7.87
Saint John's	40101M001 STJO	A1	2.14	1.85	6.08
Algonquin Park	40104M002 ALGO	A1	2.35	2.21	6.67
Ottawa	40114M001 NRC1	A1	2.65	1.40	5.95
Yellowknife	40127M003 YELL	A1	2.57	2.03	7.63
Churchill	40128M002 CHUR	A1	3.13	2.79	6.36
Schefferville	40133M002 SCH2	A1	3.16	4.03	7.78

Fortsetzung auf der folgenden Seite

<i>Fortsetzung der vorherigen Seite</i>						
Williams Lake	40134M001	WILL	A1	2.11	1.45	5.69
Flin Flon	40135M001	FLIN	A1	1.92	1.19	6.72
Whitehorse	40136M001	WHIT	A1	3.36	1.88	10.17
Goldstone	40405S031	GOLD	A1	3.10	2.22	7.01
Kokee Park	40424M004	KOKB	A1	2.92	3.86	10.61
	40424M004	KOKB	A3	2.04	2.73	6.71
Fairbanks	40408M001	FAIR	A1	3.80	2.23	8.93
	40408M001	FAIR	A2	2.49	3.04	8.04
Quincy	40433M004	QUIN	A1	2.57	1.97	7.96
Westford	40440S020	WES2	A1	2.28	1.88	6.19
Fort Davis	40442M012	MDO1	A1	2.40	1.88	7.70
Washington	40451M123	GODE	A1	2.15	1.45	5.83
	40451S003	USNO	A1	2.15	1.31	5.43
Pie Town	40456M001	PIE1	A1	2.30	1.69	5.09
North Liberty	40465M001	NLIB	A1	2.05	1.64	7.15
Brewster	40473M001	BREW	A1	2.20	1.31	5.71
Mauna Kea	40477M001	MKEA	A1	2.54	3.05	7.12
Santiago de Cuba	40701M001	SCUB	A1	2.72	2.13	7.36
Rio Grande	41507M004	RIOG	A1	2.89	1.67	6.94
La Plata	41510M001	LPGS	A1	3.12	2.28	9.11
Salta	41514M001	UNSA	A1	2.75	2.20	7.07
Fortaleza	41602M001	FORT	A1	3.15	3.86	11.48
	41602M002	BRFT	A1	1.76	1.69	4.34
Brasilia	41606M001	BRAZ	A1	2.52	2.72	9.55
Santiago	41705M003	SANT	A1	3.31	2.35	7.23
Conzeption	41719M002	CONZ	A1	2.54	1.99	5.85
Thule	43001M002	THU3	A1	1.50	1.04	6.56
Saint Croix	43201M001	CRO1	A1	2.52	2.70	8.75
Tidbinbilla	50103M108	TIDB	A1	2.14	2.33	6.64
Yarragadee	50107M004	YAR1	A1	1.81	1.91	6.93
	50107M006	YARR	A1	1.58	1.68	6.61
Hobart	50116M004	HOB2	A1	2.33	2.16	5.40
	50116M004	HOB2	A2	1.81	1.93	5.33
Coco Islands	50127M001	COCO	A1	2.56	1.95	6.89
Darwin	50134M001	DARW	A3	2.38	2.15	7.26
Alice Springs	50137M001	ALIC	A1	1.90	1.87	5.98
Karratha	50139M001	KARR	A1	1.91	1.88	6.74
Townsvillage	50140M001	TOW2	A1	2.34	2.41	6.40
Chatam Islands	50207M001	CHAT	A1	2.57	1.99	6.40
Guam	50501M002	GUAM	A2	2.91	2.48	8.30
Mc Murdo	66001M003	MCM4	A2	2.14	1.60	11.46
Mawson Station	66004M001	MAW1	A1	2.45	1.52	5.12
Sanae	66009M001	VESL	A1	1.75	1.62	6.70
Casey	66011M001	CAS1	A1	2.47	1.49	7.03
Kerguelen	91201M002	KERG	A1	2.95	2.17	7.13
Thaiti	92201M009	THTI	A1	2.60	3.05	7.63
Noumea	92701M003	NOUM	A1	2.17	2.25	7.79

Tabelle 5: VLBI-Referenzstationen: Zuordnung zum ITRF2005

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung	Lösungsnummer	Lösungsnummer im ITRF2005	Beobachtungszeitraum im ITRF2005
Ny Alesund	10317S003 7331	A1	A1	von 04.10.94 bis 31.01.06
Onsala	10402S002 7213	A1	A1	von 26.07.80 bis 15.11.05
Simeis	12337S008 7332	A1	A2	von 25.06.94 bis 23.03.05
Svetloe	12350S001 7380 (a)	A1	A1	von 06.03.03 bis 27.01.06
Medicina	12711S001 7230	A2	A1	von 05.12.96 bis 03.02.06
Noto	12717S001 7547	A1	A1	von 03.06.89 bis 23.03.05
Matera	12734S005 7243	A1	A1	von 04.10.90 bis 28.12.05
Yebes	13420S001 7333 (a)	A1	A1	von 08.06.95 bis 16.07.03
Wettzell	14201S004 7224	A1	A1	von 16.11.83 bis 03.02.06
Shanghai	21605S009 7227	A1	A1	von 09.04.88 bis 20.01.06
Urumqui	21612S001 7330	A1	A1	von 16.03.94 bis 21.12.05
Kashima	21701S004 1857	A1	A1	von 22.03.90 bis 21.12.05
Tsukuba	21730S007 7345	A1	A1	von 25.06.98 bis 10.11.98
Hartebeesthoek	30302S001 7232	A1	A1	von 09.01.86 bis 31.01.06
Algonquin Park	40104S001 7282	A1	A1	von 24.08.84 bis 03.02.06
Fairbanks	40408S002 7225	A1	A1	von 08.08.95 bis 31.10.02
	40408S002 7225	A2	A2	von 04.11.02 bis 28.01.03
Kokee Park	40424S007 7298	A1	A1	von 08.06.93 bis 03.02.06
Owens Valley	40439S006 7616	A1	A1	von 28.08.92 bis 29.09.05
Westford	40440S003 7209	A1	A1	von 13.05.81 bis 31.01.06
Fort Davis	40442S017 7613	A1	A1	von 30.05.91 bis 29.09.05
Pie Town	40456S001 7234	A1	A1	von 08.09.88 bis 29.09.05
Los Almos	40463S001 7611	A1	A1	von 21.05.91 bis 29.09.05
North Liberty	40465S001 7612	A1	A1	von 01.04.92 bis 29.09.05
Kitty Peak	40466S001 7610	A1	A1	von 01.04.92 bis 29.09.05
Hancock	40471S001 7618	A1	A1	von 01.04.92 bis 29.09.05
Brewster	40473S001 7614	A1	A1	von 21.04.93 bis 29.09.05
Mauna Kea	40477S001 7617	A1	A1	von 19.07.93 bis 29.09.05
Fortaleza	41602S001 7297	A1	A1	von 22.04.93 bis 03.02.06
Conception	41719S001 7640	A1	A1	von 13.05.02 bis 03.02.06
Saint Croix	43201S001 7615	A1	A1	von 25.06.93 bis 29.09.05
Hobart	50116S002 7242	A1	A1	von 26.09.89 bis 21.12.05

Stationen, die mit (a) gekennzeichnet sind, wurden nicht als Referenzstationen verwendet, weil die Residuen der Transformation der zeitabhängigen VLBI-Lösung auf den ITRF2005 20 mm für eine der Positionskomponenten übersteigen.

Tabelle 6: Tägliche Wiederholbarkeiten der Komponenten der VLBI-Stationspositionen (gewichtete Transformation, gewichteter RMS)

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung		Lösungsnummer	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
Ny Alesund	10317S003	7331	A1	1.15	1.07	6.58
Onsala	10402S002	7213	A1	2.38	1.15	8.49
Simeis	12337S008	7332	A1	6.70	3.25	13.25
Svetloe	12350S001	7380	A1	3.19	3.11	11.14
Medicina	12711S001	7230	A1	1.66	1.35	5.88
Noto	12717S001	7547	A1	4.55	3.76	9.25
Matera	12734S005	7243	A1	2.89	1.74	6.32
Yebes	13420S001	7333	A1	3.21	2.54	15.88
Wettzell	14201S004	7224	A1	2.07	1.37	5.27
Shanghai	21605S009	7227	A1	5.40	6.01	10.54
Urumqui	21612S001	7330	A1	8.64	1.08	7.60
Kashima	21701S004	1857	A1	14.00	7.50	15.97
Tsukuba	21730S007	7345	A1	5.43	5.31	10.61
Hartebeesthoek	30302S001	7232	A1	6.27	5.53	12.28
Algonquin Park	40104S001	7282	A1	2.78	1.73	7.61
Fairbanks	40408S002	7225	A1	2.73	2.13	6.60
	40408S002	7225	A2	2.81	2.39	9.03
Kokee Park	40424S007	7298	A1	3.61	4.53	8.08
Owens Valley	40439S006	7616	A1	0.77	0.87	5.58
Westford	40440S003	7209	A1	2.38	1.54	5.17
Fort Davis	40442S017	7613	A1	0.61	1.07	3.07
Pie Town	40456S001	7234	A1	1.00	0.92	3.51
Los Almos	40463S001	7611	A1	0.97	1.04	3.52
North Liberty	40465S001	7612	A1	0.72	1.43	3.57
Kitty Peak	40466S001	7610	A1	0.96	1.06	4.04
Hancock	40471S001	7618	A1	1.59	1.80	5.39
Brewster	40473S001	7614	A1	0.76	1.29	4.97
Mauna Kea	40477S001	7617	A1	2.51	2.87	3.39
Fortaleza	41602S001	7297	A1	3.33	7.86	18.80
Conception	41719S001	7640	A1	11.92	7.10	23.30
Saint Croix	43201S001	7615	A1	2.77	3.27	10.50
Hobart	50116S002	7242	A1	7.70	7.63	14.20

Tabelle 7: Diskontinuitäten der SLR-Stationspositionszeitreihen

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung	Epoche	Ursache
Herstmonceux	13212S001 7840	26.02.2002	unbekannt
Simosato	21726S001 7838	06.09.2004	unbekannt

Tabelle 8: SLR-Referenzstationen: Zuordnung zum ITRF2005

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung		Lösungsnummer	Lösungsnummer im ITRF2005	Beobachtungszeitraum im ITRF2005	
Grasse	10002S001	7835	A1	A1	von 11.01.93 bis 05.07.05	
	10002S002	7845	A1	A1	von 23.11.97 bis 21.09.04	
Ajaccio	10077M002	7848	(c)	A1	A1	von 11.02.02 bis 03.09.05
Metsahovie	10503S014	7806		A1	A1	von 05.03.98 bis 05.11.04
Graz	11001S002	7839		A1	A2	von 24.09.96 bis 23.12.05
Borowiec	12205S001	7811		A1	A1	von 19.07.93 bis 01.12.05
Riga	12302S002	1884 ^B	(b)	A1	A1	von 31.08.94 bis 19.12.05
Simeis	12337S006	1893	(c)	A1	A1	von 06.06.95 bis 12.10.04
Maidanak	12340S001	1863	(b)	A1	A1	von 05.11.01 bis 17.01.04
	12340S002	1864 ^B	(a/b)	A1	A1	von 17.12.93 bis 23.12.05
Matera	12734S008	7941		A1	A1	von 03.07.01 bis 24.12.05
Herstmonceaux	13212S001	7840	(c)	A1	A1	von 19.03.01 bis 24.12.05
	13212S001	7840	(c)	A1	A2	von 19.03.01 bis 24.12.05
San Fernando	13402S007	7824		A1	B1	von 12.04.99 bis 22.12.05
Zimmerwald	14001S007	7810		A1	B1	von 18.12.96 bis 24.12.05
Potsdam	14106S009	7836	(c)	A1	A1	von 04.01.93 bis 12.06.04
	14106S011	7841		A1	A1	von 08.01.03 bis 13.12.05
Wetzell	14201S018	8834		A1	A1	von 12.01.93 bis 12.12.05
Riyadh	20101S001	7832		A1	A1	von 17.01.01 bis 24.12.05
Beijing	21601S004	7249	(b)	A1	A1	von 05.05.94 bis 23.12.05
Shanghai	21605S001	7837		A1	A1	von 21.02.99 bis 14.04.02
Kunming	21609S002	7820	(a)	A1	A1	von 21.02.99 bis 14.04.02
Changchun	21611S001	7237 ^B		A1	A1	von 14.05.93 bis 23.12.05
Lhasa	21613M001	7356	(a)	A1	/	
Koganai	21704S002	7308	(a)	A1	A1	von 07.11.95 bis 02.03.05
Simosato	21726S001	7838	(b)	A1	A1	von 05.01.93 bis 24.12.05
	21726S001	7838		A2	A1	von 05.01.93 bis 24.12.05
Tanegashima Island	21749S001	7358	(a/b)	A1	/	
Hartebeesthoek	30302M003	7501		A1	A1	von 08.08.00 bis 24.12.05
Fort Davis	40442M006	7080		A1	A1	von 11.01.93 bis 22.12.05
Maui	40445M001	7210 ^B		A1	A2	von 26.01.94 bis 04.06.04
Washington	40451M105	7105		A1	A1	von 18.01.93 bis 21.12.05
	40451M116	7130	(a)	A1	/	
Monument Peak	40497M001	7110		A1	A1	von 04.01.93 bis 22.12.05
Conception	41719M001	7405		A1	A1	von 17.04.02 bis 21.12.05
Arequipa	42202M003	7403	(c)	A1	A1	von 08.02.93 bis 15.06.01
Yarragadee	50107M001	7090		A1	A1	von 27.12.92 bis 24.12.05
Mount Stromlo	50119S001	7849	(c)	A1	A1	von 09.07.98 bis 16.01.03
	50119S003	7825	(c)	A1	A1	von 28.07.01 bis 24.12.05
Tahiti	92201M007	7124		A1	A1	von 17.11.97 bis 02.11.05

Stationen, die mit (a), (b) oder (c) gekennzeichnet sind, wurden nicht als Referenzstationen verwendet (a) weil die Station im betrachteten Zeitraum weniger als 20 Wochen beobachtet wurde (b) wegen eines WRMS der Zeitreihe einer Komponente von > 20 mm (c) weil die Residuen der Transformation der SLR-Mehrjahreslösung auf ITRF2005 20 mm für eine der Positionskomponenten oder 10 mm/a für eine der Geschwindigkeitskomponenten übersteigen.

Für Stationen, die mit einem ^B gekennzeichnet sind, wurden zusätzlich Laufzeitkorrekturen (range biases) geschätzt.

Tabelle 9: Wöchentliche Wiederholbarkeiten der Komponenten der SLR-Stationspositionen (gewichtete Transformation, gewichteter RMS).

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung		Lösungsnummer	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
Grasse	10002S001	7835	A1	8.05	7.25	6.08
	10002S002	7845	A1	8.78	20.04	10.03
Ajaccio	10077M002	7848	A1	8.62	8.60	5.55
Metsahovie	10503S014	7806	A1	11.56	8.99	9.63
Graz	11001S002	7839	A1	4.89	4.00	4.18
Borowiec	12205S001	7811	A1	10.13	7.44	10.18
Riga	12302S002	1884 ^B	A1	13.76	10.23	21.71
Simeis	12337S006	1893	A1	15.38	15.72	10.49
Maidanak	12340S001	1863	A1	29.21	21.36	12.06
	12340S002	1864 ^B	A1	18.07	20.97	34.67
Matera	12734S008	7941	A1	6.84	6.07	9.19
Herstmonceaux	13212S001	7840	A1	3.81	3.68	4.05
	13212S001	7840	A2	5.07	4.39	4.76
San Fernando	13402S007	7824	B1	6.83	9.73	11.40
Zimmerwald	14001S007	7810	B1	5.14	3.99	7.52
Potsdam	14106S009	7836	A1	10.77	5.61	7.13
	14106S011	7841	A1	5.75	5.19	5.82
Wetzell	14201S018	8834	A1	5.88	4.71	6.44
Riyadh	20101S001	7832	A1	7.02	6.28	6.85
Beijing	21601S004	7249	A1	24.89	11.60	14.60
Shanghai	21605S001	7837	A1	11.46	11.86	9.19
Kunming	21609S002	7820	A1	11.63	14.15	13.20
Changchun	21611S001	7237 ^B	A1	9.63	9.67	15.56
Lhasa	21613M001	7356	A1	7.16	14.12	8.68
Koganai	21704S002	7308	A1	10.18	8.88	3.82
Simosato	21726S001	7838	A1	10.87	15.01	23.84
	21726S001	7838	A2	10.99	11.37	6.62
Tanegashima Island	Is-21749S001	7358	A1	11.16	22.13	9.16
Hartebeesthoek	30302M003	7501	A1	8.74	8.39	6.41
Fort Davis	40442M006	7080	A1	7.73	8.22	7.84
Maui	40445M001	7210 ^B	A1	6.08	9.73	13.72
Washington	40451M105	7105	A1	7.95	6.43	6.91
	40451M116	7130	A1	8.94	12.42	7.26
Monument Peak	40497M001	7110	A1	6.43	6.25	5.58
Conception	41719M001	7405	A1	12.47	8.79	6.16
Arequipa	42202M003	7403	A1	9.75	15.30	7.00
Yarragadee	50107M001	7090	A1	5.71	5.55	6.77
Mount Stromlo	50119S001	7849	A1	8.41	7.50	4.55
	50119S003	7825	A1	6.06	4.51	6.06
Tahiti	92201M007	7124	A1	8.73	7.60	5.78

Für Stationen, die mit einem ^B gekennzeichnet sind, wurden zusätzlich Laufzeitkorrekturen (range biases) geschätzt.

Tabelle 10: Verwendete Differenzvektoren zwischen GPS- und VLBI-Stationen. Wenn keine Referenzepoche für den Differenzvektor angegeben ist, ist diese nicht bekannt.

Station	GPS-Station	VLBI-Station	$\Delta X[m]$	$\Delta Y[m]$	$\Delta Z[m]$	Epoche	Quelle
10317 Ny Alesund	10317M001 NYAL	10317S003 7331	32.1130	107.7520	-1.4800		(1)
10317	10317M003 NYA1	10317S003 7331	28.7970	102.1670	-6.4640	16.08.2003	(2)
10402 Onsala	10402M004 ONSA	10402S002 7213	-52.6310	40.4640	43.8650	01.01.1999	(2)
12350 Svetloe	12350M001 SVTL	12350S001 7380	nicht gemessen				
12711 Medicina	12711M003 MEDI	12711S001 7230	-30.9094	3.3963	54.5212	01.10.2003	(2)
12717 Noto	12717M004 NOT1	12717S001 7547	16.7474	-63.6087	28.4944	25.07.2003	(2)
12734 Matera	12734M008 MATE	12734S005 7243	-10.9395	-42.2540	38.1994	26.10.2004	(2)
13420 Yebes	13420M001 YEBE	13420S001 7333	55.5220	-69.7130	-58.2990	01.01.1999	(2)
14201 Wettzell	14201M010 WTZR	14201S004 7224	-40.7970	-118.3964	61.3209	01.02.2002	(2)
21605 Shanghai	21605M002 SHAO	21605S009 7227	46.3552	67.6262	-41.8254		(1)
21612 Urumqui	21612M001 URUM	21612S001 7330	nicht gemessen				
21730 Tsukuba	21730S005 TSKB	21730S007 7345	-209.5453	29.7219	-216.8837	01.01.1999	(2)
30302 Hartebeesthoek	30302M004 HRAO	30302S001 7232	90.3001	-132.1879	34.6539	02.08.2003	(2)
40104 Algonquin Park	40104M002 ALGO	40104S001 7282	-94.7560	-61.0210	-6.6650	01.01.1999	(2)
40408 Fairbanks/Gilcreek	40408M001 FAIR	40408S002 7225	74.1260	-49.2870	31.2604	01.10.2001	(2)
40424 Kokee Park	40424M004 KOKB	40424S007 7298	0.4960	19.4002	42.2362		(1)
40440 Westford	40440S020 WES2	40440S003 7209	-26.7960	-41.0220	-30.4760	01.01.1999	(2)
40442 Fort Davis	40442M012 MD01	40442S017 7613	5989.5518	-3788.5737	-4541.7251	01.01.1999	(2)
40456 Pietown	40456M001 PIE1	40456S001 7234	-36.9160	-34.8270	-35.2550	01.01.1999	(2)
40465 North Liberty	40465M001 NLIB	40465S001 7612	62.2280	-25.3870	-3.6260	01.01.1999	(2)
40473 Brewster	40473M001 BREW	40473S001 7614	nicht gemessen				
40477 Mauna Kea	40477M001 MKEA	40477S001 7617	30.1321	-82.2265	5.9084	01.01.1999	(2)
41602 Fortaleza	41602M001 FORT	41602S001 7297	-16.5977	-21.7320	-45.8047	01.01.2006	(2)
41602	41602M002 BRFT	41602S001 7297	-23.5236	-26.9232	-45.4711		(3)
41719 Conception	41719M002 CONZ	41719S001 7640	46.6560	-50.2726	98.6173	25.11.2003	(2)
43201 Saint Croix	43201M001 CR01	43201S001 7615	77.3621	7.0895	-28.1538	01.01.1999	(2)
50116 Hobart	50116M004 HOB2	50116S002 7242	-165.3740	-67.6263	75.8209	22.03.2002	(2)

(1) <http://itrf.ensg.ign.fr/ties/ITRF2005/ITRF2005-localties.tab>
(2) http://itrf.ensg.ign.fr/local_surveys.php unter *Local ties SINEX files*
(3) IGSMAIL 5303 (<http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00026.html>, 11.07.2007)

Tabelle 11: Verwendete Differenzvektoren zwischen GPS- und SLR-Stationen. Wenn keine Referenzepoche für den Differenzvektor angegeben ist, ist diese nicht bekannt.

Station	GPS-Station	SLR-Station	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	Epoche	Quelle	
10002	Grasse	10002M006 GRAS	10002S001 7835	0.6320	44.8590	-1.2001	11.10.1999	(2)
10002		10002M006 GRAS	10002S002 7845	1.1740	81.3470	-5.6200		(1)
10503	Metsahovie	10503S011 METS	10503S014 7806	36.2160	-30.2580	-35.3880		(1)
11001	Graz	11001M002 GRAZ	11001S002 7839	2.5580	-8.5160	1.3210		(1)
12205	Borowiec	12205M002 BOR1	12205S001 7811	-25.7670	72.9080	0.3240		(1)
12734	Matera	12734M008 MATE	12734S008 7941	29.1570	22.2010	-37.9120		(1)
13212	Herstmonceaux	13212M007 HERS	13212S001 7840	-6.5050	-10.2780	3.9450		(1)
13402	San Fernando	13402M004 SFER	13402S007 7824	-45.0410	35.2725	89.5935		(1)
14001	Zimmerwald	14001M004 ZIMM	14001S007 7810	-13.5060	-5.9860	6.4200		(1)
14106	Potsdam	14106M003 POTS	14106S011 7836	-257.4550	-385.2710	238.8170		(1)
14106		14106M003 POTS	14106S009 7841	-50.0910	-95.2190	40.4380		(1)
14201	Wetzell	14201M010 WTZR	14201S018 8834	-3.8238	-68.2017	15.5177		(1)
21601	Beijing	21601M001 BJFS	21601S004 7249	-16.5010	118.2950	-146.3160		(1)
21605	Shanghai	21605M002 SHAO	21605S001 7837	645.1814	537.2972	-196.6961	28.11.2003	(2)
21609	Kunming	21609M001 KUNM	21609S002 7820	nicht gemessen				
30302	Hartebeesthoek	30302M004 HRAO	30302M003 7820	48.6258	-65.5916	42.7988	02.08.2003	(2)
40442	Fort Davis	40442M012 MD01	40442M006 7501	-22.3935	-8.4672	-23.4078	01.01.1999	(2)
40451	Washington	40451M123 GODE	40451S003 7080	nicht gemessen				
40451		40451M123 GODE	40451M105 7105	-54.2300	-97.0090	-93.8630	01.01.1999	(2)
40451		40451M123 GODE	40451M116 7130	-38.6530	-71.1050	-68.0090		(1)
40497	Monument Peak	40497M004 MONP	40497M001 7110	-31.3649	5.4557	-20.5255		(1)
41719	Conception	41719M002 CONZ	41719M001 7405	25.4485	-35.3492	74.0416		(1)
42202	Arequipa	42202M003 AREQ	42202M005 7403	18.6150	-0.5480	21.4990		(1)
50107	Yarragadee	50107M004 YARR	50107M001 7090	18.6150	12.4640	5.8460		(1)
50107		50107M006 YARR	50107M001 7090	17.5787	13.9813	9.2692	01.11.2003	(2)
92201	Tahiti	92201M009 THTI	92201M007 7124	8.4550	-24.5510	28.2988		(1)

(1) <http://itrf.ensg.ign.fr/ties/ITRF2005/ITRF2005-localties.tab>

(2) http://itrf.ensg.ign.fr/local_surveys.php unter *Local ties SINEX files*

Tabelle 12: Verwendete Differenzvektoren zwischen VLBI- und SLR-Stationen. Wenn keine Referenzepeche für den Differenzvektor angegeben ist, ist diese nicht bekannt.

Station	VLBI-Station	SLR-Station	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	Epoche	Quelle
12337 Simeis	12337S008 7332	12337S006 1893	nicht gemessen				
12734 Matera	12734S005 7243	12734S008 7941	40.0952	64.4576	-76.1100	26.10.2004	(2)
14201 Wettzell	14201S004 7224	14201S018 8834	36.9734	50.1947	-45.8031	01.02.2002	(2)
21605 Shanghai	21605S009 7227	21605S001 7837	598.8243	469.6725	-154.8715	28.11.2003	(2)
30302 Hartbeesthoek	30302S001 7232	30302M003 7820	-41.6743	66.5963	8.1449	02.08.2003	(2)
40442 Fort Davis	40442S017 7613	40442M006 7501	-6011.9450	3780.1060	4518.3170		(2)
41719 Conception	41719S001 7640	41719M001 7405	-21.2075	14.9234	-24.2757		(1)

(1) <http://itrf.ensg.ign.fr/ties/ITRF2005/ITRF2005-localties.tab>
(2) http://itrf.ensg.ign.fr/local_surveys.php unter *Local ties SINEX files*

Tabelle 13: Antennen und Empfänger auf den GPS-Ko-lokationsstationen.

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung	Epoche des Instru- menten- wechsels	Antenne	Radom	Empfänger	
Ny Alesund	10317M001 NYAL	11.03.04	AOAD/M_B	DOME	AOA BENCHMARK ACT	
	10317M003 NYA1		ASH701073.1	SNOW	AOA BENCHMARK ACT	
Onsala	10402M004 ONSA		AOAD/M_B	OSOD	ASHTECH Z-XII3	
			AOAD/M_B	OSOD	JPS E_GGD	
Svetloe	12350M001 SVTL		LEIAT504	LEIS	LEICA SR520	
Medicina	12711M003 MEDI		TRM29659.00	NONE	TRIMBLE 4000SSI	
Noto	12717M004 NOT1		TRM29659.00	NONE	TRIMBLE 4000SSI	
Matera	12734M008 MATE*		TRM29659.00	NONE	TRIMBLE 4000SSI	
			nur TRM29659.00		TRIMBLE 4000SSI	
			24.09.01			
Yebe	13420M001 YEBE	05.05.05	TRM29659.00	NONE	TRIMBLE 4000SSI	
Wetzell	14201M010 WTZR		AOAD/M_T	NONE	AOA SNR-8000 ACT	
			AOAD/M_T	NONE	TPS E_GGD	
Shanghai	21605M002 SHAO	06.08.02	AOAD/M_T	JPLA	ROGUE SNR-8100	
Urumqui	21612M001 URUM		AOAD/M_T	NONE	AOA SNR-8000 ACT	
Tsukuba	21730S005 TSKB		AOAD/M_T	DOME	ROGUE SNR-8100	
			AOAD/M_T	DOME	AOA BENCHMARK ACT	
Harte- beesthoek	30302M004 HRAO*		AOAD/M_T	NONE	ASHTECH Z-XII3	
		20.11.04	ASH701945C_M	NONE	ASHTECH Z-XII3	
Algonquin Park	40104M002 ALGO		AOAD/M_T	NONE	AOA BENCHMARK ACT	
Fairbanks	40408M001 FAIR*	10.07.02	AOAD/M_T	JPLA	AOA SNR-8100 ACT	
			AOAD/M_T	JPLA	ASHTECH UZ-12	
		24.12.04	ASH701945G_M	JPLA	ASHTECH UZ-12	
Kokee Park	40424M004 KOKB*	04.04.02	AOAD/M_T	JPLA	AOA SNR-8100 ACT	
			AOAD/M_T	JPLA	AOA SNR-12 ACT	
			16.10.02	ASH701945C_M	NONE	ASHTECH UZ-12
Westford	40440S020 WES2	12.10.02	AOAD/M_TA_NGS	NONE	ASHTECH UZ-12	
			AOAD/M_TA_NGS	NONE	ROGUE SNR-8000	
Fort Davis	40442M012 MD01	02.09.04	AOAD/M_T	JPLA	ROGUE SNR-8000	
Pietown	40456M001 PIE1		AOAD/M_T	NONE	ROGUE SNR-8000	
			AOAD/M_T	NONE	ASHTECH UZ-12	
			AOAD/M_T	JPLA	ROGUE SNR-8000	
North Liberty	40465M001 NLIB	16.04.05	AOAD/M_T	JPLA	AOA SNR-12 ACT	
Brewster	40473M001 BREW	05.08.05	ASH701945C_M	SCIT	ASHTECH UZ-12	
Mauna Kea	40477M001 MKEA		AOAD/M_T	NONE	ASHTECH Z-XII3	
Fortaleza	41602M001 FORT		AOAD/M_TA_NGS	DOME	ROGUE SNR-8000	
	41602M002 BRFT		LEIAT504	NONE	LEICA GRX1200PRO	
Conception	41719M002 CONZ		JPSREGANT_DD_E	NONE	JPS LEGACY	
Saint Croix	43201M001 CR01*		AOAD/M_T	JPLA	ASHTECH Z-XII3	
			ASH701945G_M	JPLA	ASHTECH Z-XII3	
Hobart	50116M004 HOB2		AOAD/M_T	NONE	AOA ICS-4000Z ACT	
			29.03.02	AOAD/M_T	NONE	ASHTECH Z-XII3
			03.04.02	AOAD/M_T	NONE	AOA ICS-4000Z ACT
		05.10.05	AOAD/M_T	NONE	ASHTECH UZ-12	

* Station mit Antennen oder Radomwechsel. Auf allen übrigen Stationen fanden entweder keine Instrumentenwechsel oder nur Empfängerwechsel beziehungsweise Änderungen der Empfängersoftware statt.

Tabelle 14: Antennen der VLBI-Ko-lokationsstationen.

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung	Antennenmontierung	Antennen- durchmesser [m]	Radom
Ny Alesund	10317S003 7331	Azimut/Elevation	20.0	ja
Onsala	10402S002 7213	Azimut/Elevation	20.0	
Svetloe	12350S001 7380	Azimut/Elevation	32.0	
Medicina	12711S001 7230	Azimut/Elevation	32.0	
Noto	12717S001 7547	Azimut/Elevation	32.0	
Matera	12734S005 7243	Azimut/Elevation	20.0	ja
Yebes	13420S001 7333	Azimut/Elevation	13.7	
Wetzell	14201S004 7224	Azimut/Elevation	20.0	
Shanghai	21605S009 7227	Azimut/Elevation	25.0	
Urumqi	21612S001 7330	Azimut/Elevation	25.0	
Tsukuba	21730S007 7345	Azimut/Elevation	32.0	ja
Hartebeesthoek	30302S001 7232	Polar	26.0	
Algonquin Park	40104S001 7282	Azimut/Elevation	46.0	
Fairbanks	40408S002 7225	XY	26.0	
Kokee	40424S007 7298	Azimut/Elevation	20.0	
Westford	40440S003 7209	Azimut/Elevation	18.0	
Fort Davis	40442S017 7613	Azimut/Elevation	25.0	
Pie Town	40456S001 7234	Azimut/Elevation	25.0	
North Liberty	40465S001 7612	Azimut/Elevation	25.0	
Brewster	40473S001 7614	Azimut/Elevation	25.0	
Mauna Kea	40477S001 7617	Azimut/Elevation	25.0	
Fortaleza	41602S001 7297	Azimut/Elevation	14.2	
Conception	41719S001 7640	Azimut/Elevation	6.0	
Saint Croix	43201S001 7615	Azimut/Elevation	25.0	
Hobart	50116S002 7242	XY	26.0	

Station	DOMES-Nummer und Kurzbezeichnung	Laser	Detektor	Prozessierung	Zähler	Operationstyp
Grasse	10002S001 7835					
	10002S002 7845	ND:YAG	APD		Dassault	Single to Multi Photons
Metsahovie	10503S014 7806	ND:YAG	PMT	CFD	Latvian University	Single to Multi Photons
Graz	11001S002 7839*	ND:VAN	CSPAD	TWC	Dassault/Graz	Multi Photons
Borowiec	12205S001 7811	ND:YAG	PMT	CFD	Stanford	Few to Multi Photons
Matera	12734S008 7941	ND:VAN	MCP	CFD	HTSI	Multi Photon
Herstmonceaux	13212S001 7840	ND:YAG	CSPAD		Stanford	Single Photon
San Fernando	13402S007 7824	ND:YAG	CSPAD	CFD	Stanford	Single to Multi Photons
Zimmerwald	14001S007 7810	TI:SA	PMT	CFD	Stanford	Single to Few Photons
Potsdam	14106S009 7836	ND:YAG	APD	TWC	Stanford	Single Photon
	14106S011 7841	ND:YAG	SPAD	CFD	Stanford (seit 19.02.2004 Zähler des Inst. for Electronics der Univ. Riga)	Single Photon
Wetzell	14201S018 8834	ND:YAG	MCP	CFD	LeCroy	Few Photons
Beijing	21601S004 7249	ND:YAG	CSPAD	CFD	Stanford	Multi Photons
Shanghai	21605S001 7837	ND:YAG	CSPAD	TWC	Hewlett-Packard	Single to Multi Photons
Kunming	21609S002 7820	ND:YAG	CSPAD	CFD	Stanford	Single to Multi Photons
Hartebeesthoek	30302M003 7501	ND:YAG	MCP	CFD	Hewlett-Packard	Few to Multi Photons
Fort Davis	40442M006 7080	ND:YAG	PMT	CFD	EG&G	Single Photon
Washington	40451M105 7105	ND:YAG	MCP	CFD	Hewlett-Packard	Few to Multi Photons
	40451M116 7130	ND:YAG	MCP	CFD	Hewlett-Packard	Few to Multi Photons
Monument Peak	40497M001 7110	ND:YAG	MCP	CFD	Hewlett-Packard	Few to Multi Photons
Conception	41719M001 7405	TI:SA	CSPAD	TWC	PESO Consulting	Single Photon
Arequipa	42202M003 7403	ND:YAG	MCP	CFD	Hewlett-Packard	Few to Multi Photons
Yarragadee	50107M001 7090	ND:YAG	MCP	CFD	Hewlett-Packard	Few to Multi Photons
Tahiti	92201M007 7124	ND:YAG	MCP	CFD	Hewlett-Packard	Few to Multi Photons

* Auf allen Stationen werden die Laserpulse mit einer maximalen Taktrate von 20 Hz generiert, nur Graz hat eine Taktrate von 1000 Hz.

Abkürzungen:

ND:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
ND:VAN	Neodymium-Vanadate-Laser
TI:SA	Titan-dotierter Saphirkristall-Laser
APD	Avalanche Photodiode (Photon-Lawinen-Diode)
PMT	Photo Multiplier Tube (Sekundärelektronenvervielfältiger)
MCP	Micro Channel Plate (Vielkanalplatten zum Nachweis von Einzelphotonen)
SPAD (CSPAD)	Single Photon Avalanche Diode (Einzel-Photon-Lawinen-Diode)
TWC	Time Walk Compensated (Zuordnung der Zeitmarken bei Erreichen einer festgelegten Pulsstärke)
CFD	Constant Fraction type Discriminator (Zuordnung der Zeitmarken bei Erreichen eines festgelegten Bruchteils der Gesamtpulsstärke)

Tabella 16: Differenzen zwischen terrestrisch gemessenen und aus den Raumbeobachtungsverfahren berechneten Differenzvektoren für Ko-lokationen zwischen GPS und VLBI. Die angegebenen Standardabweichungen sind aus den täglichen Wiederholbarkeiten der Stationskoordinaten berechnet und geben nur die Genauigkeit der gerechneten Differenzvektoren an.

Station	GPS- Station	VLBI- Station	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]	Vektor- differenz [mm]	Strecken- differenz [mm]	Standardabweichungen [mm]		
								Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
Ny Ålesund	NYAL A1	7331 A1	-2.47	2.30	11.83	12.30	-4.11	0.104	0.091	0.543
	NYA1 A1	7331 A1	1.67	-2.58	1.86	3.60	3.01	0.115	0.099	0.513
Onsala	ONSA A1	7213 A1	-0.18	0.11	-2.60	2.61	-0.50	0.260	0.171	0.665
Medicina	MEDI A1	7230 A1	-0.73	4.30	-13.68	14.36	-3.77	0.247	0.210	0.857
Noto	NOT1 A1	7547 A1	3.36	5.06	-6.75	9.08	-5.16	1.860	1.536	3.780
Matera	MATE A1	7243 A1	3.46	5.63	1.79	6.85	-0.78	0.336	0.203	0.740
Yebeş	YEBE A1	7333 A1	-4.01	3.44	7.62	9.27	1.47	1.434	1.135	7.100
Wetzell	WTZR A1	7224 A1	4.01	0.23	-1.43	4.26	2.38	0.136	0.088	0.351
Shanghai	SHAO A1	7227 A1	1.80	-8.46	1.02	8.71	-5.90	0.963	1.066	1.886
Tsukuba	TSKB A1	7345 A1	-0.61	0.31	0.55	0.88	-0.71	0.604	0.587	1.207
Hartebeesthoek	HRAO A1	7232 A1	-5.75	2.12	9.43	11.24	3.35	0.626	0.550	1.236
Algonquin Park	ALGO A1	7282 A1	0.91	1.77	-5.31	5.67	3.01	0.237	0.158	0.653
	FAIR A1	7225 A1	-3.07	-1.12	-4.03	5.19	3.02	0.324	0.234	0.776
Fairbanks	FAIR A2	7225 A2	1.74	-4.35	-2.78	5.45	3.29	0.291	0.269	0.936
	KOKB A1	7298 A1	-4.04	-2.37	-3.62	5.92	-3.44	0.318	0.401	0.976
Kokee Park	KOKB A3	7298 A1	-4.82	-4.41	-8.99	11.12	-4.41	0.270	0.343	0.686
	Westford	WES2 A1	-1.83	-8.84	-2.16	9.28	7.19	0.201	0.137	0.459
Fort Davis	MD01 A1	7613 A1	2.34	0.76	-2.87	3.78	-0.65	0.195	0.315	0.925
Pie Town	PIE1 A1	7234 A1	5.64	11.74	14.15	19.24	-5.68	0.288	0.262	0.990
North Liberty	NLIB A1	7612 A1	-2.12	0.89	13.62	13.82	4.50	0.222	0.415	1.062
Mauna Kea	BREW A1	7614 A1	-4.36	-0.60	-5.00	6.66	1.23	0.700	0.804	0.971
Fortaleza	MKEA A1	7617 A1	-8.12	1.69	-33.35	34.37	-3.82	0.340	0.764	1.847
	FORT A1	7297 A1	-3.82	3.22	-26.67	27.14	-0.37	0.410	0.789	1.903
Conception	BRFT A1	7297 A1	-1.52	-1.75	2.15	3.17	-2.08	1.125	0.673	2.205
Saint Croix	CONZ A1	7640 A1	-5.07	-0.99	8.83	10.23	-3.07	0.806	0.949	3.054
Hobart	CRO1 A1	7615 A1	-6.13	-11.06	5.09	13.63	11.65	1.092	1.081	2.016
	HOB2 A2	7242 A1	-9.31	-6.80	2.70	11.85	10.81	1.091	1.080	2.016

Tabelle 17: Höhendifferenzen auf Ko-lokationsstationen

Station	GPS-Station	VLBI-Station	Höhendifferenz GPS - VLBI [m]	Höhendifferenz GPS - WVR [m] (CONT05)	
Ny Ålesund	NYAL A1	7331 A1	-8.826	7.48 ¹	
	NYA1 A1	7331 A1	-3.100		
Onsala	ONSA A1	7213 A1	-13.713		
Svetloe	SVTL A1	7380 A1	-9.357		
Medicina	MEDI A1	7230 A1	-17.147		
Noto	NOT1 A1	7547 A1	-16.887		
Matera	MATE A1	7243 A1	-7.718		
Yebes	YEBE A1	7333 A1	-7.110		
Wetzell	WTZR A1	7224 A1	-3.098		
Shanghai	SHAO A1	7227 A1	-7.365		
Urumqi	URUM A1	7330 A1	-1174.369		
Tsukuba	TSKB A1	7345 A1	-17.369		
Hartebeesthoek	HRAO A1	7232 A1	-1.540		
Algonquin Park	ALGO A1	7282 A1	-23.105		-0.91 ³
Fairbanks	FAIR A1	7225 A1	-13.092		
Kokee	KOKB A1	7298 A1	-9.236		-1.28 ²
Westford	WES2 A1	7209 A1	-1.752		
Fort Davis	MDO1 A1	7613 A1	398.077		
Pie Town	PIE1 A1	7234 A1	-16.945		
North Liberty	NLIB A1	7612 A1	-15.222		
Brewster	BREW A1	7614 A1	-11.880		
Mauna Kea	MKEA A1	7617 A1	-8.353		
Fortaleza	FORT A1	7297 A1	-3.631		
	BRFT A1	7297 A1	-1.405		
Conception	CONZ A1	7640 A1	9.757		
Saint Croix	CRO1 A1	7615 A1	-16.929		
Hobart	HOB2 A1	7242 A1	-24.034		

¹ Betreiber der Station Wetzell, persönliche Mitteilung, 2007
² Betreiber der Station Kokee Park, persönliche Mitteilung, 2007
³ M. Caissy (NRCan), persönliche Mitteilung, 2007