



D I P L O M A R B E I T

Die Berechnung des momentanen Erdrotationsvektors aus VLBI- und Ringlaserdaten

Ausgeführt am Institut für
Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Höhere Geodäsie
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Harald Schuh,
Dipl.-Ing. Dr.techn. Paulo Jorge Mendes Cerveira
von der TU Wien und
Associate Prof. Docent Dr.-Ing. Rüdiger Haas
von der Chalmers Tekniska Högskola

durch

Lucia Plank

Am Rosenhag 17
4600 Wels

Wien, im August 2008

Vorwort

Ich freue mich, mit dieser Diplomarbeit mein Studium in der Art beenden zu dürfen, wie ich die vergangenen 6 Jahre erlebt habe. Das Arbeiten war stets aufregend und interessant, ich habe viel gelernt und wurde gefordert, wenn ich einmal nicht weiter wusste waren Personen um mich die mir halfen, und das Ergebnis, das traue ich mich sagen, ist wissenschaftlich wertvoll.

Ein Studium besuchen zu dürfen, bei dem sich die Lehrenden über die große Anzahl von zwei Dutzend Student/innen freuen und von denen man persönlich beim Namen gekannt wird, ist heutzutage wohl als Luxus zu betrachten und ich habe es genossen. Zusätzlich bekam ich während meines 6-monatigen ERASMUS-Studentenaustauschs an der Chalmers Tekniska Högskola in Göteborg die Möglichkeit, am Observatorium in Onsala zu arbeiten. Dort konnte ich die Forschung nicht nur beobachten, sondern auch selber betreiben und ich habe sie als meinen Weg für die nächste Zukunft erkannt.

Mein Gruß und Dank gilt all jenen Personen, die mir diese schöne Zeit ermöglicht haben, insbesondere

Frau Johanna Bauer (früher Jakubec), meine DG-Lehrerin, die mich auf die Idee des Vermessungs-Studiums gebracht hat,

allen Professoren und Lehrenden an der TU Wien, die stets motivierend und unterstützend waren,

allen Freunden, Busfahrern und Mitarbeitern vom Observatorium in Onsala, die mich so nett aufgenommen haben,

meinen Mitstudent/innen, vor allem den 6 „Vomessa“ die das Studium niemals langweilig werden ließen, sowie

meiner Familie, ohne die sowieso nichts geht.

Speziell für die Diplomarbeit möchte ich mich bei

Rüdiger Haas, Paulo Jorge Mendes Cerveira und Prof. Harald Schuh

für ihre Unterstützung, Motivation und anerkennende Resonanz bedanken. Es gibt keine bessere Motivation und es macht mir große Freude, dass sich Andere für meine Arbeit interessieren, mein Programm verwenden und damit neue Ergebnisse erzielen!

Vielen Dank dafür!

Lucia Plank

0.1 Kurzfassung

Mit den heute üblichen Methoden zur Messung der Erdrotation, vor allem die VLBI, wird für gewöhnlich ein Punkt als Pol bestimmt, der in Wirklichkeit kein echter Pol ist. Der so genannte CIP wird durch Definitionen festgelegt, die aus Gewohnheit und Tradition willkürlich gewählt worden sind und nicht auf theoretischen Überlegungen zu den tatsächlichen Bewegungen beruhen. Seit einigen Jahren haben die Ringlaser als inertielle Messverfahren eine Genauigkeit und Stabilität erreicht, mit denen aus ihren Messungen auf Schwankungen der Erdrotation geschlossen werden kann. Diese beziehen sich allerdings auf den Erdrotationsvektor, welcher die tatsächliche Drehachse des Erdkörpers repräsentiert. Will man die mit beiden Messverfahren erzielten Ergebnisse vergleichen, so müssen sie auf denselben Pol bezogen sein.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird zuerst der Unterschied zwischen dem herkömmlich bestimmten Pol und dem Erdrotationsvektor dargelegt und die unterschiedlichen Schwankungen der Erdrotation in Form von Polbewegung und Änderung der Tageslänge aufgezählt und erklärt.

Nach der theoretischen Einleitung wird im Hauptteil eine Möglichkeit präsentiert, aus z. B. durch VLBI bestimmten Erdorientierungsparametern den Erdrotationsvektor zu berechnen und gegebenenfalls mit den Zeitreihen des Ringlasers vergleichen zu können. Dabei handelt es sich um ein MATLAB-Programm, das sowohl von der Funktionsweise als auch vom Formalismus her ausführlich beschrieben wird. Durch die Implementierung des Präzessions-/Nutationsmodells IAU 2000A, des Modells der ozeanischen Gezeiten von Eanes, jenes für die Polgezeiten, sowie der Berechnung der Oppolzerterme nach Brzeziński, kann das Programm sehr vielseitig eingesetzt werden.

Ein Auszug davon ist im dritten Teil der Arbeit zu finden. Es werden u. a. (1) berechnete Oppolzerterme mit den Werten aus dem Modell verglichen, (2) die frequenzabhängige Umrechnungsfunktion beim Übergang vom CIP auf den wahren Rotationspol überprüft, (3) hochauflösende VLBI Messdaten aus CONT02 und CONT05 ausgewertet, sowie (4) eine Zeitreihe des Ringlasers aus dem Jahr 2006 mit mittels dem Programm berechneten Werten für die Erdrotation verglichen.

Diese Diplomarbeit zeigt die Vorteile für eine Auswertung von subtäglichen Variationen der Erdrotation beim Übergang vom üblichen CIP auf den wahren Rotationspol und welche tragende Rolle der Ringlaser hier als alternatives Messmedium übernehmen kann.

0.2 Abstract

Today's commonly used techniques for measuring the earth's rotation define a pole that in reality doesn't represent a real pole. The Very Long Baseline Interferometry (VLBI) falls into that category. The so called Celestial Intermediate Pole (CIP) arises out of habit and tradition and without any theoretical foundation. In the last few years ringlasers reached a precision and stability to enable measurements of the earth's rotation. However, the ringlaser is sensible for movements of the rotation vector, which represents the real rotation axis of the earth. To compare results from both techniques, they have to be referred to the same pole.

This thesis starts with a demonstration of the differences between the commonly used CIP and the instantaneous rotation pole (IRP). It gives a simple and clearly arranged overview on the different variations of the earth's rotation divided into polar motion and length of day (LOD).

After introducing the theoretical background, the main part deals with the solution of calculating the rotation vector and combining earth orientation data obtained by the two completely different measuring techniques, the VLBI and the ringlaser. This is done by a routine written in MATLAB, which is described in detail concerning functionality and formalism. With the implementation of the common models, such as the precession-/nutation model IAU 2000A, the ocean tides model by Eanes, the model for gravitational tides in polar motion and Brzeziński's model to calculate the Oppolzer terms, the program can be used in different ways.

A short insight in this variability is given in the third part of this work. The reader can find (1) a comparison of the Oppolzer terms, calculated once with the model and once with the program, (2) an examination and verification of the mathematical formula used to calculate the different amplitudes of polar motion when changing from the CIP to the IRP, (3) results achieved with high resolved data from the VLBI CONT02 and CONT05 campaigns and (4) a comparison of earth orientation data obtained from ringlaser measurements of the year 2006 with those calculated by the program.

This thesis shows how the change from the CIP to the IRP can give new insights in the high resolved subdaily polar motion and how the ringlaser, as a new and alternative measuring technique can play a decisive role in this task.

0.3 Abkürzungen und Kurzformen

BIH	<i>Bureau International de l'Heure</i>
CIP	<i>Celestial Intermediate Pole</i>
CONT	<i>Continuous VLBI Campaign</i>
CRS	<i>Celestial Reference System</i>
DORIS	<i>Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite instrument</i>
ERV	Erdrotationsvektor
EOP	Erdorientierungsparameter
Fortran	Programmiersprache
GALILEO	europäisches Satellitennavigationssystem
GLONASS	<i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i> (russisches Satellitennavigationssystem)
GNSS	<i>Global Navigational Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i> (hier ist damit das US-amerikaische NAVSTAR-GPS System gemeint)
IAU	<i>International Astronomical Union</i>
ICRF	<i>International Celestial Reference Frame</i>
ICRS	<i>International Celestial Reference System</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
ILS	<i>International Latitude Service</i>
IPMS	<i>International Polar Motion Service</i>
IRP	<i>Instantaneous Rotation Pole</i> (momentaner Erdrotationspol)
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
IVS	<i>International VLBI Service for Geodesy and Astronomy</i>
LLR	<i>Lunar Laser Ranging</i>
LOD	<i>Length of Day</i> (Tageslänge)
MATLAB	Software der Firma „ <i>The MathWorks</i> “
MJD	Modifiziertes Julianisches Datum
RL	Ringlaser
SET	<i>Solid Earth Tides</i> (Gezeiten der festen Erde)
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
TAI	<i>Temps Atomique International</i> (internationale Atomzeit)
TRS	<i>Terrestrial Reference System</i>
TT	<i>Terrestrial Time</i>
UT	<i>Universal Time</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
VLBI	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>

0.4 Einheiten

Zeitmaße:

h	Stunde
s	Sekunde
ms	Millisekunde
μ s	Mikrosekunde

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ ms} = 3,6 \cdot 10^9 \mu\text{s}$$

Längenmaße:

m	Meter
cm	Zentimeter
mm	Millimeter

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 1000 \text{ mm}$$

Winkelmaße:

°	Grad
", as	Bogensekunde
mas	Millibogensekunde
μ as	Mikrobogensekunde
rad	Radian

$$1^\circ = 60'' = 60 \text{ as}$$

$$1 \text{ as} = 1 \cdot 10^3 \text{ mas} = 1 \cdot 10^6 \mu\text{as}$$

$$1 \text{ rad} = \frac{180^\circ}{\pi}$$

Umrechnung:

Über den Erdradius ($R = 6371 \text{ km}$) kann ein Winkelmaß in die entsprechende Länge an der Erdoberfläche umgerechnet werden.

$$1 \text{ as} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot 6371 \cdot 10^3 \text{ m} \triangleq 31 \text{ m}$$

$$1 \text{ mas} \triangleq 3,1 \text{ cm}$$

Inhaltsverzeichnis

0.1	Kurzfassung	II
0.2	Abstract	III
0.3	Abkürzungen und Kurzformen	IV
0.4	Einheiten	V
1	Einleitung	1
I	Die Erdrotation	4
2	Die astronomische Erdrotation	5
3	Die geophysikalische Erdrotation	6
3.1	Achsen	6
3.2	Die Polbewegung	8
3.2.1	Säkularbewegung	8
3.2.2	Die Chandlerbewegung	8
3.2.3	Jährlicher Term	9
3.2.4	Subtägliche Fluktuationen	10
3.2.5	Erzwungene Polbewegung	11
3.3	Variation der Tageslänge	13
3.3.1	Die mittlere Rotationsgeschwindigkeit	13
3.3.2	Die langfristige Verlangsamung der Rotationsgeschwindigkeit	14
3.3.3	Dekadische Variationen	15
3.3.4	Kurzperiodische Schwankungen	15
3.3.5	Aperiodische Veränderungen	16
4	Terminologie der Erdrotation	16
5	Messung der momentanen Erdrotation	17
5.1	Geschichte	17
5.2	Modellierung	19
5.3	Messgeräte	22
5.3.1	VLBI	22
5.3.2	Der Ringlaser	25
5.3.3	Ein Vergleich von VLBI und RL	29
II	Ausarbeitung	31

6	Problemstellung	31
6.1	Was heute möglich ist	31
7	Idee	32
8	Realisierung	33
8.1	Das Programm ERV.m	34
8.1.1	Beschreibung	34
8.1.2	Unterprogramme	37
8.2	Formalismus	39
8.3	Berechnung der Transformationsmatrix T	41
8.3.1	Polmatrix W	42
8.3.2	Erddrehungsmatrix R	43
8.3.3	Nutationsmatrix Q	43
8.4	Berechnung der zeitlichen Ableitung der Transformationsmatrix \dot{T}	44
8.5	Umrechnung in relative Änderung der Sagnacfrequenz	44
8.6	Nutationsmodell IAU 2000A	45
8.7	Modell der Oppolzerterme	46
8.8	Modell der ozeanischen Gezeiten	46
8.9	Lunisolare gravitative Gezeiten	47
III	Ergebnisse	49
9	Vergleich des Präzessions-/Nutationsmodells mit dem Modell der Oppolzerterme	49
10	Einfluss der ozeanischen Gezeiten	50
11	Der ERV aus VLBI-Messungen	53
11.1	Daten	53
11.2	CONT02	53
11.3	CONT05	55
11.4	Tägliche Messwerte gegenüber stündlichen Messwerten	56
12	Das Erdrotationssignal aus Ringlaserdaten	59
12.1	Aufbereitung der RL-Daten	60
12.1.1	Lokale Effekte	60
12.1.2	Elimination von Trend und Datensprüngen	62
12.2	Vergleich mit berechneten Werten	63

13 Schlussfolgerungen und Ausblick	64
A Literaturverzeichnis	67
B Lebenslauf	71

1 Einleitung

„Die Erde bewegt sich um die Sonne“ und „sie dreht sich um die eigene Achse“, zwei Aussagen, bei denen es sich heutzutage nicht mehr um Vermutungen handelt, sondern um wissenschaftlich bewiesene Tatsachen. „Warum?“ Die Frage nach der Ursache der Erdbewegung ist eine sehr heikle, die mithilfe von kosmologischen Theorien zu erklären versucht wird, letztendlich aber nie völlig ohne eine gewisse philosophische Grundeinstellung auskommen kann. Weitaus einfacher zu beantworten ist hingegen die Frage nach dem „Wie“. Seit Menschengedenken interessieren sich Wissenschaftler/innen für den Ablauf und die Auswirkungen der Erdbewegung. „Wie lange dauert ein Tag?“, „Wie ändern die Sterne ihre Positionen am Himmel?“, oder „Auf welcher geografischen Breite befinde ich mich?“, sind Fragen, die nicht nur rein philosophischer Natur sind, sondern bei Aufkommen der Zeitmessung bzw. der Navigation mit Hilfe der Sonne und den Sternen auch im täglichen Leben eine wichtige Rolle spielen. Nach und nach wurden plausible Erklärungen und Antworten auf diese Fragen gefunden, es wurden mehr und mehr Beobachtungen durchgeführt, die einige Erklärungen wieder zunichte machten und neue Fragen aufwarfen. Bis heute herrscht ein Wettlauf aus immer genauer werdenden Beobachtungsmethoden gegen immer komplexere physikalische Erklärungen, angetrieben vom natürlichen Wissensdurst der Menschen sowie dem daraus hervorgehenden praktischen Nutzen.

Nach einer Definition von F. Helmert¹ ist die Geodäsie *die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche*. Ihre Aufgabe besteht in der Bestimmung der Figur der Erde, ihres Schwerfelds, sowie ihrer Orientierung und Lage im Weltraum. Beschäftigt man sich, so wie in der vorliegenden Arbeit, mit dem Rotationsverhalten der Erde, so ist man im Bereich der Höheren Geodäsie tätig.

Bei der Beschreibung der Erdrotation, genauer gesagt der Erdorientierung, bedarf es einer Unterscheidung der auftretenden Bewegungen. Ändert die Erdachse ihre Lage im Raum, d. h. in Relation zu den Himmelskörpern, wird dies *Präzession* bzw. *Nutation* genannt. Findet die Bewegung der Achse allerdings relativ zum Erdkörper statt, dann ändert sich die Lage des Pols, man spricht von einer *Polbewegung*. Außerdem kann sich die Erdrotation noch in ihrer Geschwindigkeit ändern, welche der Drehrate entspricht. Die Auswirkung davon ist eine Veränderung der *Tageslänge*. Mittlerweile kann die Menschheit auf eine lange Tradition von Beobachtungen der Erdorientierung zurückgreifen und die meisten, der zum Teil sehr großen Variationen, können wissenschaftlich erklärt werden.

Würde man die aktuelle Orientierung der Erde nicht berücksichtigen, so wären viele Standardverfahren der Orientierung und der Punktbestimmung auf oder im Umfeld der Erde äußerst fehlerhaft oder gar undenkbar. Als bekannte Beispiele seien hier die Bahnbestimmung bei aller Art von Satellitenverfahren (z.B.: GPS, GALILEO), die Navigation

¹Friedrich Robert Helmert, deutscher Geodät und Mathematiker, 1843-1917

von Raketen und Raumfähren, die Bestimmung eines globalen Koordinatensystems, oder auch ein Gebiet für jedermann, die Kalibrierung einer Sonnenuhr genannt. Neue Entwicklungen fortschrittlicher (Mess-)Techniken mit immer besseren Genauigkeiten erfordern eine möglichst präzise Kenntnis der Erdorientierung, sowie eine gute Prädiktion. Besonders, um eine gute Vorhersage zu ermöglichen, ist es notwendig, die vielfältigen Ursachen der Variationen zu kennen, sowie ihre Perioden und Amplituden zu bestimmen. Dabei ist der Bogen sehr weit zu spannen, reichen doch die zu betrachtenden Zeiträume von einigen Stunden bis zu mehreren (tausend) Jahren, die Größenordnungen von minimalst bis mit freiem Auge erkennbar und die beteiligten wissenschaftlichen Teilgebiete beinahe durch die gesamte Bandbreite der Geowissenschaften. Neben gravitativen Störungen durch Himmelskörper und einem vermuteten inneren Antrieb durch den Erdkern, üben vor allem jegliche Art von Massenvariationen sowie das Vorhandensein von relativen Drehimpulsen Einfluss auf die Erdrotation aus. Die Hauptverursacher dafür sind die Atmosphäre, die Ozeane, die Eisbedeckung, die Wasserverteilung auf der Erde und große topografische Veränderungen.

Ein Fortschritt in der Bestimmung der Erdorientierungsparameter ist nun einerseits durch eine Steigerung der Präzision der Messung, durch Weiterentwicklung der Messmethoden und -geräte möglich, aber andererseits auch durch ein besseres Verständnis des Systems Erde, mit all ihren geodynamischen und geophysikalischen Prozessen. Letzteres ist schon alleine genug Motivation für die Erforschung der Erdrotation.

Ich persönlich habe mich im Zuge eines Seminarvortrages zum ersten Mal näher mit der Erdrotation beschäftigt. Dabei bekam ich einen Einblick in die Problematik der Bestimmung des Erdrotationsvektors, ein Produkt, das trotz seiner klar definierten und einfachen Funktion mit den heute gängigen Messverfahren nicht direkt gemessen werden kann, für das Verständnis und die Interpretation von geophysikalischen Vorgängen jedoch notwendig ist. Vom Ringlaser erfuhr ich bei einem Besuch an der Fundamentalstation in Wettzell, und schon damals fand ich es faszinierend, wie man mit einem so einfachen Prinzip von zwei gegensätzlich gerichteten Lichtwegen die Erdrotation messen kann. In Zusammenarbeit mit meinen Betreuern an der TU Wien, Prof. Schuh und Hr. Mendes Cerveira, wurde das Ziel dieser Diplomarbeit als die Kombination von VLBI- und Ringlasermessungen der Erdrotation im subtäglichen Bereich definiert. Die Ausarbeitung durfte ich während meines Auslandssemesters in Schweden, am Observatorium in Onsala durchführen. Dabei stand mir Rüdiger Haas immer helfend zur Seite und es konnte schließlich ein Berechnungsprogramm erstellt werden, mit welchem Erdrotationsmessungen aus der VLBI in die Komponenten des momentanen Erdrotationsvektors umgerechnet und mit den Messungen des Ringlasers verglichen und kombiniert werden können.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird das erstellte Programm erklärt und beschrieben, sowie erste damit erzielte Ergebnisse präsentiert. Für den hochfrequenten Bereich

gelingt der Vergleich von VLBI- und Ringlaserdaten und der Ringlaser kann als neue und alternative Möglichkeit zur Beobachtung der Erdrotation bestätigt werden.

Beim Verfassen dieser Arbeit wurde versucht, einen möglichst einfachen und kompakten Stil zu verwenden, und sie somit gleichermaßen für Spezialisten dieses Gebiets aber auch für Laien verständlich und interessant zu machen. Ziel des ersten Teils ist es, den Leser/innen einen Überblick über die theoretischen Grundlagen zu geben, insbesondere die Problematik der Erdrotation zu erfassen, eine Vorstellung der Größenordnungen zu erhalten und den üblichen Weg der Messung kennen zu lernen. In Teil II wird zuerst auf die Problemstellung dieser Arbeit eingegangen und anschließend der Lösungsweg mit der Entwicklung des Berechnungsprogramms, inklusive allen verwendeten Formalismen und Modellen, erklärt. Eine Beschreibung und Interpretation von bisher durchgeführten Berechnungen bildet den dritten Teil dieser Diplomarbeit, welcher mit einem Abschnitt über die gewonnenen Erkenntnisse und daraus resultierenden Schlussfolgerungen das Werk beendet.

Teil I

Die Erdrotation

Die Erdrotation beschreibt die Drehung des Erdkörpers um seine Achse. Aufgrund der Komplexität des Systems Erde, mit ihrer ständig in Bewegung stehenden und veränderlichen Atmosphäre, den Ozeanen, der variablen Eisbedeckung und Massenverteilung, sowie dem Einwirken von Gezeitenkräften, verläuft diese Rotation nicht gleichmäßig. Zur Beschreibung der momentanen Rotation muss einerseits die Bewegung der Erdachse im Raum und andererseits die Lage der Achse in Bezug zum Erdkörper betrachtet werden.

Die *geophysikalische Erdrotation* ist die Bewegung der Erde ohne das Einwirken von äußeren Kräften. Die Lage des momentanen Erdrotationsvektors auf der Erdfigur wird als *Polbewegung*, seine Rotationsrate als *Tageslänge* bezeichnet.

Bei der *astronomischen Erdrotation* wird die Auswirkung von Attraktionskräften auf den Erdkörper und seine Drehachse relativ zu einem Inertialsystem untersucht. Die lunisolar verursachte Bewegung wird *Präzession* bzw. *Nutation* genannt.

Die Gesamtbewegung der Erde im Raum ist die Überlagerung von geophysikalischer und astronomischer Erdrotation. Sie setzt sich aus vielen Teilbewegungen unterschiedlichster Ursachen, Perioden und Amplituden zusammen, die weiter unten aufgelistet und beschrieben sind. Es wurde versucht, die Informationen über die Erdrotation aus den umfangreichen Werken von Gross [2007], Eubanks [1993] und Schödlbauer [2000] kompakt zusammen zu fassen, für die Unterteilung nach den Periodenlängen waren u. a. die Vorlesungsunterlagen von Schuh und Mendes Cerveira [2007] sowie ein Artikel über die geophysikalischen Anregungen der Erdorientierungsparameter von Dehant et al. [2005] hilfreich.

Die Unterscheidung in geophysikalische bzw. astronomische Erdrotation hat den Vorteil einer klaren und eindeutigen Zuordnung. Sie ist auch eine sehr anschauliche, da sich erstere in einer Veränderung der Polhöhe, also der Breite des Beobachters, und die zweitgenannte in einer Veränderung der Deklination der Sterne zeigt. Dennoch wird sie in der Fachliteratur nicht oft verwendet. Wie in Kapitel 5.2 noch näher beschrieben wird, werden an Stelle der eben beschriebenen, durch ihre Ursachen festgelegten, Parameter üblicherweise fünf Erdorientierungsparameter verwendet, die auf willkürlichen Definitionen beruhen. Diese Tradition macht es oft schwer, in der Fachliteratur beschriebene Phänomene richtig zuzuordnen und mit ihren Ursachen in Verbindung bringen zu können. Dieses Problem wurde schon relativ bald erkannt und es finden sich immer wieder Autoren (z.B.: Melchior [1980] oder Chao [1995]), die in ihren Veröffentlichungen darauf aufmerksam machen und sich um eine einheitliche Benennung bemühen. In dieser Arbeit wird an der strengen

Unterscheidung zwischen astronomischer und geophysikalischer Erdrotation festgehalten, weil es laut Meinung der Autorin dadurch einfacher ist, ein korrektes Gesamtbild aller Phänomene der Erdrotation zu erhalten.

2 Die astronomische Erdrotation

Das Phänomen der astronomischen Erdrotation ist in der Physik als das Prinzip des ausweichenden Kreisels bekannt. Betrachtet man die Erde als Kegel, verursachen die von Mond, Sonne und Planeten auf die Erde einwirkenden Attraktionskräfte aufgrund der Ekliptikschiefe und des Äquatorwulstes der Erde eine Ausweichbewegung der Rotationsachse um die Drehimpulsachse. Das Prinzip wird am Beispiel der Sonne erklärt:

Die Äquatorebene der Erde, die senkrecht auf die Drehimpulsachse steht, ist gegenüber der Ekliptik² um einen Winkel von $\epsilon = 23,5^\circ$ geneigt. Die in solch einer Konstellation auf den Erdkörper wirkenden Kräfte sind einerseits die aus der Drehbewegung um die Sonne resultierenden Fliehkräfte, andererseits die Massenanziehung der Sonne. Während die Fliehkräfte in jedem Punkt einer nicht rotierenden Erde annähernd gleich sind, sind die Gravitationskräfte auf der zur Sonne gewandten Seite größer als auf der Schattenseite. Wäre die Erde eine Kugel, so würden sich die Kräfte gegenseitig aufheben. Da unser Planet aber eher einem abgeplatteten Rotationsellipsoid mit Äquatorwulst gleicht, wirkt ein Drehmoment, das die Erde aufzurichten versucht, d. h. die Äquatorebene in die Erdbahnebene bringen möchte.

In Kombination mit der Eigenrotation der Erde bewirkt dieses Drehmoment eine Bewegung der Erdachse im Raum, die so genannte *Präzession*. Die Drehimpulsachse der Erde umläuft im Laufe von rd. 26 000 Jahren auf einem Kegelmantel mit dem Öffnungswinkel ϵ einmal den Ekliptikpol (siehe Abbildung 1).

Bezieht man in die obige Überlegung noch den Einfluss des Mondes und der Planeten mit ein, so wird die Hauptbewegung von einer Vielzahl kleinerer, periodischer Anteile überlagert, den *Nutationen*. Die größte Nutation wird durch die 5° Neigung der Erdbahn gegenüber der Mondbahn verursacht und hat eine Periode von 18,6 Jahren mit einer maximalen Amplitude von $9,2''$. In den heutigen Nutationsmodellen (z.B. IAU 2000) werden mehr als 1000 Terme berücksichtigt, die nächstgrößten Amplituden haben Perioden von 13,7 Tagen, 1/2 Jahr, 1 Jahr und 9,3 Jahren.

²Bahnebene der Erde um die Sonne

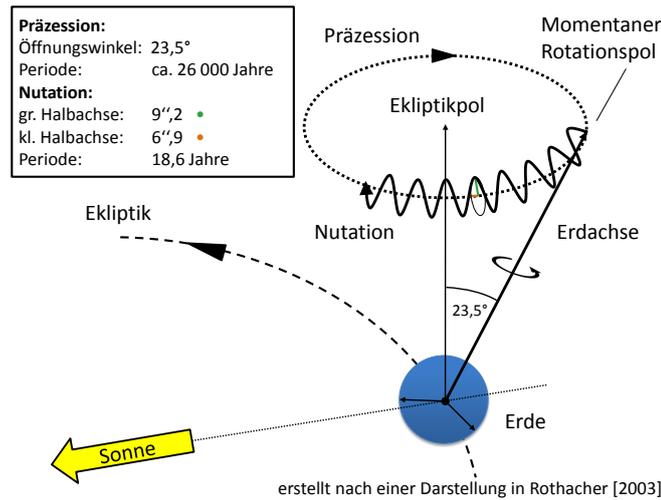


Abbildung 1: Präzession und Nutation der Erde

3 Die geophysikalische Erdrotation

3.1 Achsen

Betrachtet man die Erde als Rotationskörper, wird grundsätzlich zwischen drei Achsen unterschieden:

Die *Rotationsachse* ist jene virtuelle Linie, um die sich ein Körper tatsächlich dreht. Der diese Drehung beschreibende Vektor wird *Rotationsvektor* genannt. Der Betrag dieses Vektors ist gleich dem Absolutwert der Winkelgeschwindigkeit.

Besteht der Körper aus Massenelementen, so verursacht die Drehung ein Massenträgheitsmoment, das durch den Trägheitstensor I beschrieben werden kann. Jenes kartesische System, in dem das Trägheitsmoment durch eine Diagonalmatrix ausgedrückt werden kann, ist das Koordinatensystem der Hauptträgheitsachsen. Im Fall der Erde weist seine z -Achse in die Richtung des größten Hauptträgheitsmoments und wird *Figurenachse* genannt. Die Richtung der x -Achse stimmt mit jener des kleinsten Hauptträgheitsmoments überein. Die Figurenachse resultiert direkt aus der Massenverteilung im Erdkörper, welche bei der Polbewegung eine entscheidende Rolle spielt.

Die dritte Achse ist die *Drehimpulsachse*. Sie gibt die Richtung des für die Rotation verantwortlichen Impulses, sozusagen der wirkenden Drehkraft an.

In einem körperfesten Bezugssystem setzt sich der Drehimpuls \vec{L} aus der Summe des Produkts des Trägheitstensors I mit dem Erdrotationsvektor $\vec{\Omega}$ und den relativen Dre-

himpulsen \vec{H} zusammen:

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\Omega} + \vec{H} \quad (1)$$

mit

$$I = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Unter der Annahme der Drehimpulserhaltung verändert sich der Erdrotationsvektor einerseits durch Massenverlagerungen, welche eine Änderung der Hauptträgheitsmomente A , B und C bedeuten, und andererseits durch Bewegungen relativ zum rotierenden Bezugssystem, wie z.B. Winde oder Strömungen.

Im Fall der Erde liegen die Impuls- und die Rotationsachse sehr nah beisammen (wenige Zentimeter an der Erdoberfläche), während die Figurenachse bis zu einigen Metern von der Rotationsachse abweichen kann.

Zur Beschreibung der auftretenden Schwankungen der Rotation wird ein terrestrisches, also erdfestes Bezugssystem gewählt. Dabei bildet die Figurenachse die z-Achse und erfährt daher keine Bewegung in diesem System. Es werden die Positionen an der Erdoberfläche der Impuls- bzw. der Rotationsachse in Bezug auf die Figurenachse dargestellt. Dabei sei in Erinnerung gerufen, dass im Raum zumindest bei der geophysikalischen Erdrotation die Drehimpulsachse fixiert ist und sich der Erdkörper samt Rotations- und Trägheitsachse darum herum bewegt. Abbildung 2 zeigt die Stellung der Achsen mit ihren größten Bewegungen, der freien und der erzwungenen Polbewegung.

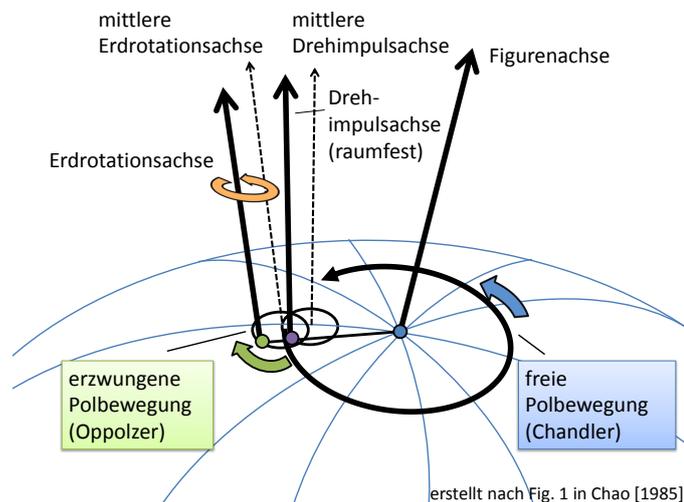


Abbildung 2: Relevante Achsen der geophysikalischen Polbewegung

Die auftretenden Polschwankungen werden nach Bewegungsmuster, Ursache, Periode und Amplitude unterschieden und im Folgenden etwas näher beschrieben. Es soll ein Überblick

gegeben werden, weshalb der geringe Unterschied zwischen Impuls- und Rotationsachse vernachlässigt wird.

3.2 Die Polbewegung

Als *Polbewegung* wird jener Teil des Erdrotationsvektors bezeichnet, der die Lage der Rotationsachse bezüglich der Figurenachse beschreibt. Sie setzt sich aus mehreren Teilbewegungen zusammen, deren Hauptverursacher in unterschiedlichsten Arten von Massenverlagerungen auf der Erde zu suchen sind.

3.2.1 Säkularbewegung

Die auch *Polwanderung* genannte Säkularbewegung des Erdrotationspols beschreibt die langsame, aber kontinuierliche Verschiebung des Pols in Richtung 79° West. Die Ursache liegt in der Theorie des postglazialen isostatischen Ausgleichs. Während der letzten Eiszeit kam es in einigen Gebieten der Erde durch die Gewichtsbelastung von Schnee und Eis zu Deformationen der Erdkruste und somit zu einer Veränderung des Trägheitstensors. Nach dem Abschmelzen des Eises vor rd. 10 000 Jahren ist die durch den Drang zum Erlangen eines isostatischen Gleichgewichtszustandes verursachte Rückbewegung der Erdkruste bis heute in Form einer Landhebung zu beobachten. Dieses vor allem in Kanada und Skandinavien beobachtete Phänomen ist der Grund einer langfristigen Verschiebung des Erdrotationspols.

Periode:	-
Amplitude:	3,5 mas/Jahr (10 cm/Jahr)
Ursache:	isostatischer Ausgleich nach der letzten Eiszeit

3.2.2 Die Chandlerbewegung

Die Chandler- oder freie Polbewegung ist die größte zu beobachtende Polbewegung. Es handelt sich um eine annähernd kreisförmige Bewegung der Rotationsachse um die Figurenachse, die ohne das Zutun von äußeren Drehmomenten vom Erdkörper selbst verursacht und immer wieder neu angetrieben wird.

L. Euler³ hat im 18. Jh. zum ersten Mal die Ausmaße dieser Bewegung für eine starre Erde berechnet. Seine vorhergesagte Periodendauer von $T_{Euler} = 304$ Tage konnte jedoch nie beobachtet werden. Grund dafür ist die Tatsache, dass die Erde nicht starr, sondern viskoelastisch ist. Rund 100 Jahre nach Euler wurde von S. C. Chandler⁴ die Periode der Polbewegung anhand von Beobachtungen von F. Küstner⁵ zu $T_{Chandler} = 432$

³Leonhard Euler, schweizer Mathematiker, 1707-1783

⁴Seth Carlo Chandler, US-amerikanischer Astronom, 1846-1913

⁵Karl Friedrich Küstner, Professor für Astronomie in Bonn (D), 1856-1936

Tage korrigiert. Heute weiß man, dass die Periode leicht schwankt und sich die Amplitude der Bewegung unvorhersagbar ändert. Durch immer wieder neue Theorien über den Aufbau und die Vorgänge im Erdinneren versucht man die genauen Gründe der Chandlerbewegung zu finden und zu modellieren. Mit Sicherheit weiß man, dass sie ständig neu angetrieben wird, da sie sonst mit der Zeit verschwinden würde. Beim heutigen Stand der Wissenschaft wird die Ursache für die Fortdauer der Bewegung im dynamischen System der Atmosphäre und den Ozeanen vermutet. Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten und Schwankungen ist die ständige Beobachtung (z.B. mit VLBI) die einzige Möglichkeit diese Bewegung bestimmen und berücksichtigen zu können.

Periode:	ca. 432 Tage (rd. 14 Monate)
Amplitude:	max. 0,2" (6 m), nicht vorhersagbar!
Ursache:	freies Taumeln des Erdkörpers; ständige Anregung durch Atmosphäre und Ozeane (?)

3.2.3 Jährlicher Term

Neben der 14-monatigen Chandlerbewegung ist auch eine jährliche Bewegung zu beobachten, die vor allem durch Schwankungen des Oberflächendrucks auf den Erdkörper verursacht wird. Zusätzlich zu dieser atmosphärischen Variation werden rund 25% der Ursachen der saisonal bedingten variablen Wasserverteilung auf der Erde zugeschrieben [Wahr, 1996]. Werden die eben genannten Einflussgrößen mit ausreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung erfasst, so können sie mit den sogenannten Drehimpulsfunktionen mit der Polbewegung in Verbindung gebracht werden. Neben der dadurch hervorgerufenen großen jährlichen Bewegung mit progradem Umlaufsinn sind auch eine kleinere im retrograden Bereich, sowie saisonale Schwankungen in der Polbewegung beobachtbar.

Periode:	ca. 365 Tage
Amplitude:	0,1" (3 m)
Ursache:	Druckschwankungen in der Atmosphäre, saisonale Variationen in den Ozeanen und der Hydrologie

Durch die Überlagerung der Chandlerbewegung mit der jährlichen Schwingung kommt es zu einer Schwebungserscheinung mit einer Periode von etwa 6,75 Jahren. In Abbildung 3 (a) und (b) ist die Polbewegung seit 1962 aufgezeichnet, wobei in (a) die Zeitreihe der Polbewegung in y-Richtung um einen konstanten Wert von 500mas verschoben ist. Bei den Daten handelt es sich um die C04 Serie des IERS mit einer zeitlichen Auflösung von einem Wert pro Tag. Im Spektrum (c) sind die jährliche sowie die Chandlersche Periode gut erkennbar.

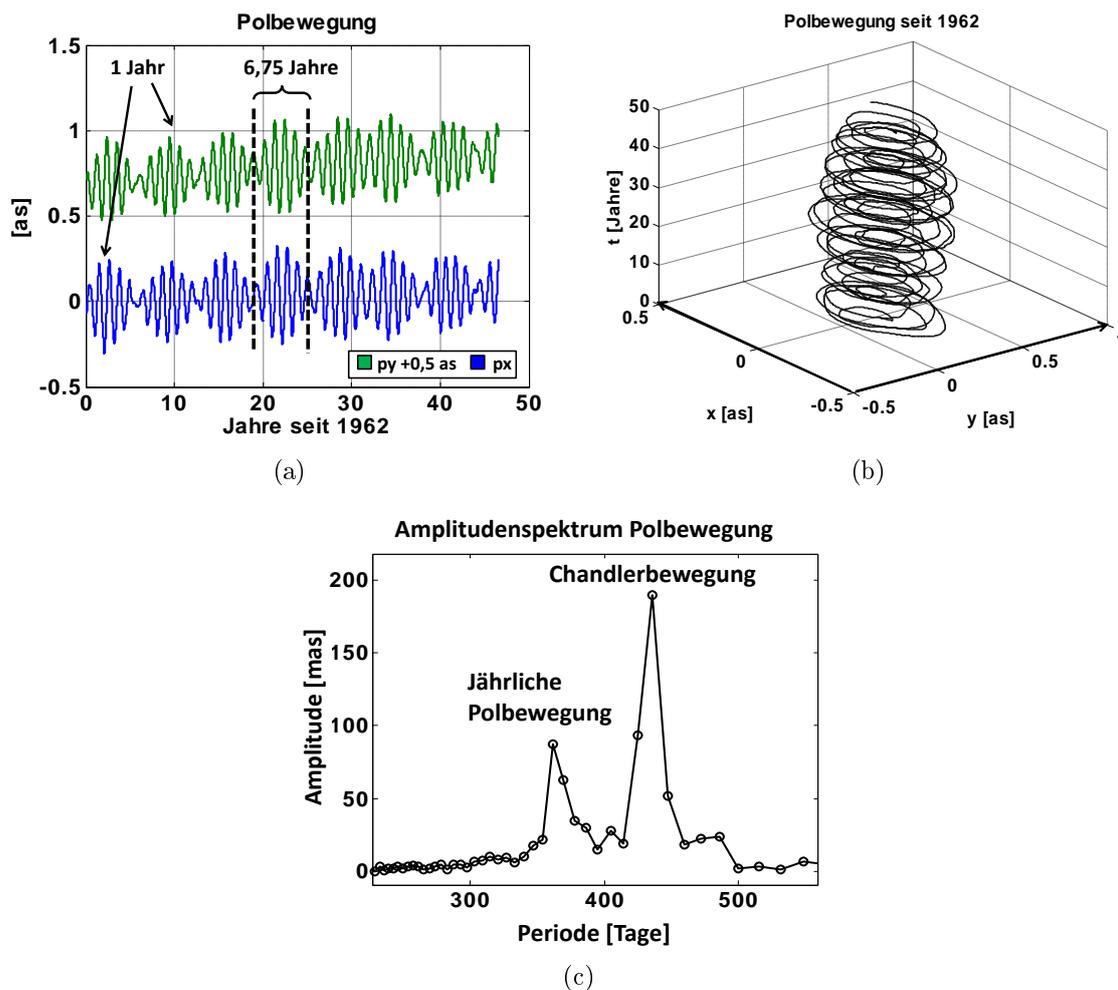


Abbildung 3: Polbewegung seit 1962

3.2.4 Subtägliche Fluktuationen

Für hochfrequente Anteile der Polbewegung sind vor allem die täglichen und subtäglichen Ozeangezeiten verantwortlich (vgl. Kap. 8.8 bzw. 10). Der größte Anteil kommt von der so genannten M2 Tide mit einer Periodendauer von 12,42 Stunden. Des Weiteren tragen die gravitativ verursachten Polgezeiten (siehe Kap. 8.9) sowie atmosphärische Kräfte zu kleinen Schwankungen des Erdrotationsvektors bei. Für das Studium der subtäglichen Anteile der Polbewegung werden zeitlich hochauflösende Messreihen benötigt. Zur Zeit eignen sich dazu die CONT Serien der VLBI, in Zukunft könnte der Ringlaser hier eine führende Rolle übernehmen.

Periode: 24 h, 12 h bzw. kürzer

Amplitude: bis max. 1 mas (3 cm)

Ursache: Ozeangezeiten, Polgezeiten, atmosphärische Kräfte

In Abbildung 4 wurde eine Frequenzanalyse der CONT02 Messreihe durchgeführt (nähere Informationen siehe Kap. 11.2). Die größten Amplituden sind bei -24, -8, +12 und um

+25 Stunden zu erkennen, wobei im prograden⁶ täglichen Bereich aufgrund des kurzen Zeitraums von 14 Tagen die Perioden nicht gut getrennt werden konnten.

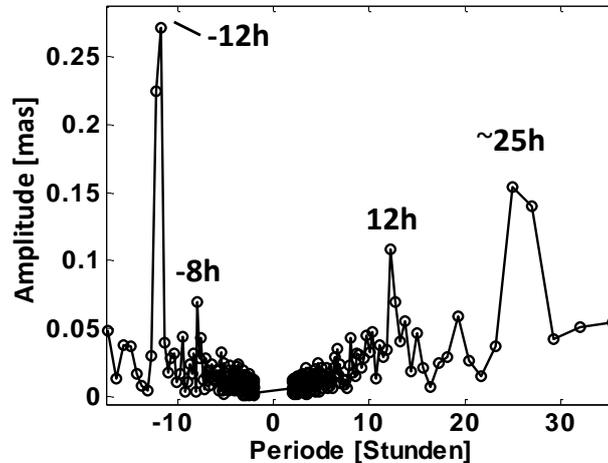


Abbildung 4: Periodenspektrum der CONT02 Zeitreihe, subtägliche Polbewegung

3.2.5 Erzwungene Polbewegung

Die erzwungene Polbewegung ist eine durch die Drehmomente von Sonne und Mond hervorgerufene Bewegung der realen Drehimpuls- bzw. Rotationsachse der Erde um die von äußeren Drehmomenten unbeeinflussten Achsen. Im erdfesten Bezugssystem hat diese nach T. Oppolzer⁷ benannte *Oppolzerbewegung* tägliche, retrograde Perioden und schwankt in der Amplitude innerhalb von 14 Tagen zwischen 0 und 0,02".

Obwohl es sich bei der Oppolzerbewegung um eine tatsächliche Polbewegung handelt, wird sie nur selten erwähnt und ist auch in den Zeitreihen der Polbewegung des IERS nicht enthalten. Der Grund dafür ist einzig eine aus Tradition und Möglichkeiten der Messverfahren heraus entwickelte Definition, nach der jede tägliche, retrograde Bewegung im terrestrischen System als Nutation zu betrachten ist und somit im Nutationsmodell berücksichtigt wird (siehe auch Kap. 5.2).

Der Ringlaser ist das erste Messgerät, mit dem die erzwungene Polbewegung direkt gemessen werden kann. Alle anderen geodätischen Messmethoden können sie nicht von der Nutation unterscheiden. Obwohl sie nie direkt beobachtet werden konnte, gibt es für die Oppolzerterme gute Modelle, wie z.B. jenes von A. Brzeziński aus dem Jahr 1986,

⁶Prograd bzw. retrograd geben die Richtung der Rotationsbewegung an. Mit bzw. gegen die Hauptrichtung bedeutet im Fall der Polbewegung in dieselbe bzw. gegen die Richtung der größten Bewegung, der Chandlerschen Bewegung. Vom Pol aus gesehen ist mit prograd gegen den Uhrzeigersinn \odot und mit retrograd im Uhrzeigersinn \ominus gemeint.

⁷Theodor Ritter von Oppolzer, österreichischer Mathematiker und Astronom, 1841-1886

das in Kap. 8.7 näher beschrieben wird. In Abbildung 5 (a) sind die modellhaft berechneten Oppolzerterme für einen Zeitraum von 4 Monaten, überlagert mit der mittleren Polbewegung, dargestellt. Wie im Periodenspektrum (b) erkennbar ist, liegen die größten Amplituden der erzwungenen Polbewegung bei -25,8 und -23,9 Stunden.

Periode: rd. 1 Tag, retrograd
 Amplitude: variiert innerhalb von 14 Tagen zw. 0 und 0,02" (60 cm)
 Ursache: lunisolare Gravitationskräfte

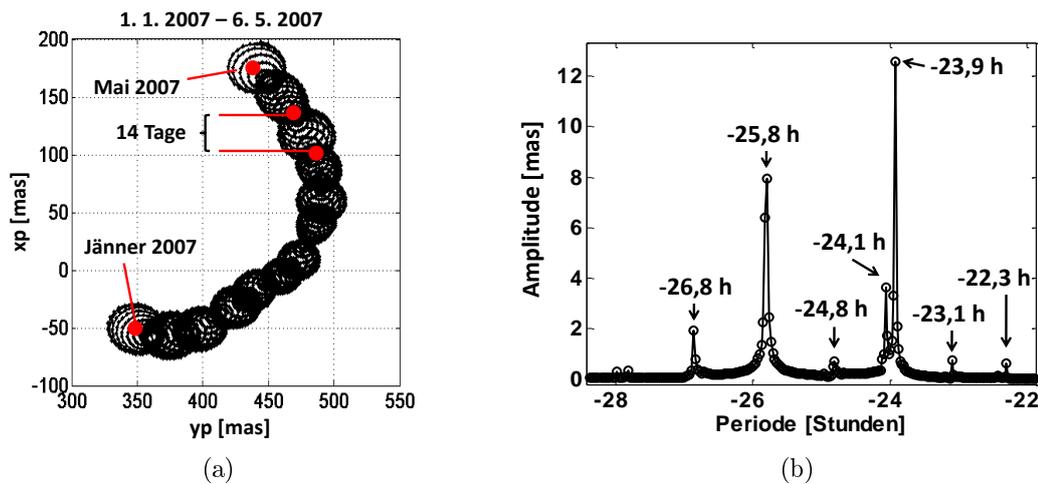


Abbildung 5: Modell der Oppolzerterme, überlagert mit der mittleren Polbewegung (a), Periodenspektrum (b)

Um zwischen der gemessenen Polbewegung ohne der Oppolzerbewegung und der Bewegung des momentanen Erdrotationsvektors unterscheiden zu können, werden zwei Begriffe definiert:

Die *geodätische Polbewegung* beschreibt die Lage des konventionellen Pols (CIP) im terrestrischen Bezugssystem, ausgedrückt durch die Polkoordinaten x_p und y_p . Die Oppolzerbewegung ist nicht in der geodätischen Polbewegung enthalten.

Mit *geophysikalischer Polbewegung* meint man hingegen die Lage des momentanen Erdrotationsvektors bzw. des momentanen Rotationspols (IRP) im Bezug zum Pol des ITRF, ausgedrückt durch die Komponenten m_x und m_y .

Auch bei der Richtung der Koordinatenachsen ist Vorsicht geboten, wie Abbildung 6 zeigt. Während die x-Achse in beiden Systemen Richtung Greenwich orientiert ist, weist die y-Achse im Polkoordinatensystem (x_p, y_p) nach Westen, im System zur Beschreibung der Lage des Erdrotationsvektors (m_x, m_y) jedoch nach Osten. Dies bedeutet, bei direkten Vergleichen von geodätischer und geophysikalischer Polbewegung ein Vorzeichenwechsel der y-Komponente durchgeführt werden muss.

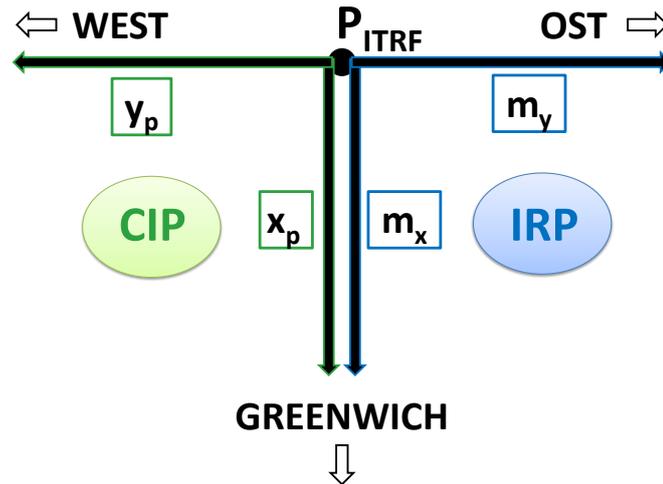


Abbildung 6: Orientierung der Koordinatensysteme

3.3 Variation der Tageslänge

Ändert sich der Betrag des Erdrotationsvektors, so ändert sich die Drehgeschwindigkeit der Erde. Für einen Tag betrachtet, bedeutet dies eine minimale Verlängerung oder Verkürzung der Umdrehungszeit, also der Dauer eines Tages. Neben einer langzeitlichen Verlangsamung beeinflussen vor allem Winde und Strömungen die aktuelle Drehgeschwindigkeit der Erde.

3.3.1 Die mittlere Rotationsgeschwindigkeit

Die Erde dreht sich zur heutigen Zeit mit einer mittleren Winkelgeschwindigkeit von

$$\Omega_N = 7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}. \quad (3)$$

Dies bedeutet, sie benötigt

$$T = \frac{2\pi}{\Omega_N} = 23 \text{ h}_{56} \text{ min}_{04} \text{ sek} \quad (4)$$

für eine Drehung um 360° . Die Umdrehung findet in Bezug zum Inertialsystem statt, weshalb dieser Zeitraum auch ein *1 Sterntag (sideral day)* genannt wird. Unsere Zeitrechnung auf der Erde orientiert sich jedoch am aktuellen Sonnenstand, und ein *Sonnentag (solar day)* hat definitionsgemäß 86400 Sekunden, also exakt 24 Stunden. Der Unterschied zwischen einem Stern- und einem Sonnentag wird deutlich, wenn man Abbildung 7 betrachtet. Zur Position 1 befinden sich die Sonne und ein dahinter befindlicher Stern im Meridian des Beobachters. In der Zeit, in der sich die Erde einmal um 360° dreht, wandert sie auch ein Stück auf der Erdbahn um die Sonne weiter und somit steht nach einem Sterntag zwar

der Stern wieder im Meridian, die Sonne jedoch noch nicht. Um denselben Sonnenstand wie in Position 1 zu erreichen, muss sich die Erde noch um $\frac{360}{365} \approx 1^\circ$ weiterdrehen. Ein Sterntag ist somit um rd. $3^{\text{min}}65^{\text{sek}}$ kürzer als ein Sonnentag, was sich im Laufe eines Jahres zu einem vollen Tag aufsummiert [Bretterbauer und Schuh, 2004].

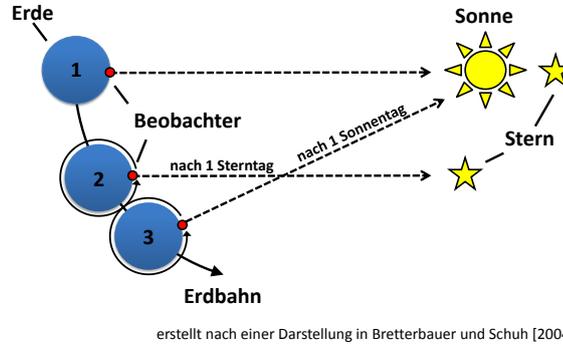


Abbildung 7: Der Unterschied zwischen einem Sterntag und einem Sonnentag

Spricht man von der Variation der Rotationsgeschwindigkeit der Erde, so wird dies meist als Abweichung $dUT1$ der Weltzeit (UT1) von einer gleichförmigen Atomzeitskala (UTC) ausgedrückt (5), oder als Exzess zur nominalen Tageslänge ΔLOD (*length of day*) angegeben, die den Unterschied zwischen der astronomisch bestimmten Tageslänge und 86400 Sekunden angibt (6).

$$dUT1 = UT1 - UTC \quad (5)$$

bzw.

$$\Delta LOD(t) = LOD(t) - LOD_0 = \frac{2\pi}{\Omega_N + \delta\Omega(t)} - \frac{2\pi}{\Omega_N} \quad (6)$$

3.3.2 Die langfristige Verlangsamung der Rotationsgeschwindigkeit

Erste Anzeichen für eine langfristige Verlangsamung der Erdrotation wurden beim Studium alter Aufzeichnungen von Sonnen- bzw. Mondfinsternissen gefunden.⁸ Bei der Berechnung der damaligen Konstellation der Himmelskörper mit der heutigen Erdrotationsrate hätten diese Ereignisse in anderen Gegenden der Erde beobachtet werden müssen, als dies tatsächlich der Fall war. Erst nach Anbringen eines linearen Terms der Verlangsamung mit der Zeit konnten die Berechnungen mit den antiken Aufzeichnungen in Einklang gebracht werden.

Grund für die Verlangsamung ist zum Großteil der Energieverlust durch die Gezeitenreibung, kleine Beiträge entstehen durch Änderungen im axialen Trägheitsmoment aufgrund von Massenverlagerungen, z.B. durch Abschmelzen der polaren Eisbedeckung. Der durch die Gezeitenreibung schwindende Drehimpuls der Erde geht auf den Mond

⁸z.B.: Sonnenfinsternis in Babylon, 136 v. Chr.

über, der sich aufgrund der Gesamtdrehimpulserhaltung rund 3 cm pro Jahr weiter von der Erde entfernt.

Periode: linear
 Amplitude: +2 ms/Jh.
 Ursache: Gezeitenreibung, postglaziale Effekte, Abschmelzen der Pole

3.3.3 Dekadische Variationen

Beim Studium von Zeitreihen der Erdrotationsrate sind eindeutig dekadische Variationen von einigen Millisekunden erkennbar. Die Ursache dafür wird im Zusammenspiel von Kern und Mantel im Erdinneren vermutet, bedarf aber noch weiteren Untersuchungen.

Periode: nicht periodische, dekadische Fluktuationen
 Amplitude: einige Millisekunden
 Ursache: Kern-Mantel Interaktionen (?)

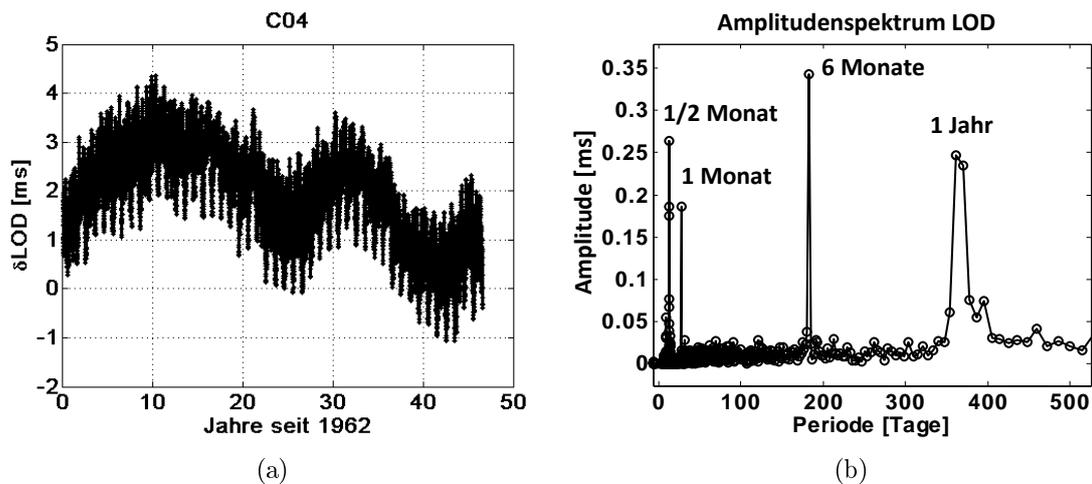


Abbildung 8: Zeitreihe der Rotationsgeschwindigkeit seit 1962 (a) und das Amplitudenspektrum (b)

3.3.4 Kurzperiodische Schwankungen

Kurzperiodische Schwankungen der Erdrotation resultieren aus Interaktionen mit der Atmosphäre, Effekten der zonalen Erdzeiten, sowie der Ozeangezeiten. Ihre Perioden reichen von jährlich bis zu wenigen Stunden, ihre Amplituden betragen bis zu 1 ms.

Periode:	6, 12 Monate (a); 27 bzw. 14 Tage (b); 12 bzw. 24 h (c)
Amplitude:	bis zu 1 ms
Ursache:	Drehimpulsaustausch mit der Atmosphäre (a), zonale Erdgezeiten (b), Ozeangezeiten (c)

In Abbildung 8 ist die Rotationsgeschwindigkeit der Erde in Form der täglichen C04 Daten des IERS seit 1. Jänner 1962, im Zeitbereich (a) sowie im Frequenzbereich (b) dargestellt. Im Zeitbereich sind die dekadischen und die jährlichen Schwankungen gut erkennbar, die kürzeren Frequenzen sind dem Spektrum zu entnehmen.

3.3.5 Aperiodische Veränderungen

Neben den beschriebenen periodischen Schwankungen der Erdrotation gibt es auch aperiodische und abrupte Veränderungen der Rotationsgeschwindigkeit. Diese werden meist durch Winde und Strömungen verursacht, aber auch einmalige Ereignisse wie große Erdbeben oder extreme Wetterlagen spielen dabei eine wichtige Rolle.

So konnten z. B. Zeiträume von Störungen des normalen Zirkulationssystems zwischen der Atmosphäre und dem pazifischen Ozean, die so genannten *El Niño* Phasen, Variationen der Rotationsgeschwindigkeit zugeordnet werden [z. B. Eubanks, 1993]. Auch große Erdbeben verändern theoretisch durch dabei hervorgerufene Massenverlagerungen die Erdrotation, jedoch sind die Auswirkungen meist zu klein um sie messen zu können [Chao und Gross, 1995]. Aber auch anthropogene Objekte können das Rotationsverhalten der Erde beeinflussen. Chao schreibt zum Beispiel von der Änderung des hydrologischen Gleichgewichts durch den Bau großer Staudämme und ihren theoretischen Auswirkungen auf die Erdrotation [Chao, 1995].

Generell besteht in diesem Bereich noch viel Raum für die Forschung, wobei die Geodäsie durch eine Steigerung der Messgenauigkeit und der Messrate zu einem besseren Verständnis der geodynamischen Prozesse auf der Erde beitragen kann. Dabei könnte abermals der Ringlaser als kontinuierliches und hoch auflösendes Messverfahren eine entscheidende Rolle spielen.

4 Terminologie der Erdrotation

In der Wissenschaft der Erdrotation findet man leider immer wieder unterschiedliche Bezeichnungen für dieselben Phänomene, was leicht zu Verwechslungen und Verlieren des Überblicks führen kann. Abbildung 9 zeigt die schon zuvor eingeführte Unterscheidung in geophysikalische und astronomische Erdrotation. Das entscheidende Kriterium dabei ist das Einwirken von äußeren Drehmomenten (D) auf den Erdkörper. Wird die Erde

ohne den Einfluss von äußeren Drehmomenten betrachtet, so spricht man von der geophysikalischen Erdrotation. Sie wird unterteilt in die Polbewegung, mit ihrem säkularen, freien, jährlichen und hochfrequenten Anteil, und in die Tageslänge, mit langfristiger, dekadischer, kurzperiodischer und aperiodischer Variation. Die Präzession und die Nutation werden von externen Drehmomenten hervorgerufen und bilden die astronomische Erdrotation. Eine kleine Ausnahme ist die erzwungene Polbewegung, die zwar durch lunisolare Gezeitenkräfte verursacht wird, sich im täglichen Bereich jedoch durch eine Variation der Breite, also eine Polbewegung und nicht durch eine Veränderung der Deklination der Sterne, was einer Nutation entspräche, bemerkbar macht. Da die Oppolzerbewegung nicht immer in die Polbewegung miteinbezogen ist, wird diese nochmals in die geophysikalische mit und in die geodätische Polbewegung ohne Oppolzerbewegung unterteilt.

Es wurde versucht, die zuvor in dieser Arbeit beschriebenen Komponenten der Rotationsbewegung der Erde nach dem in der Abbildung gezeigten Schema zu benennen und somit eine klare und eindeutige Zuordnung zu ermöglichen.

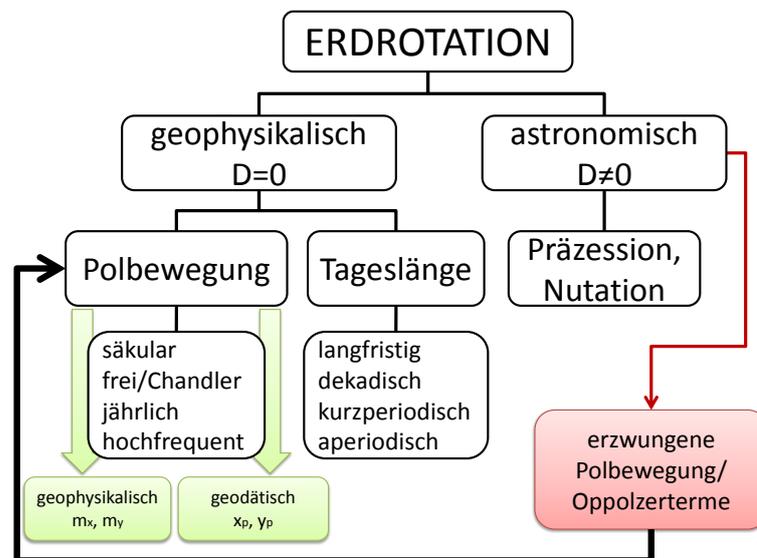


Abbildung 9: Terminologie der Erdrotation

5 Messung der momentanen Erdrotation

5.1 Geschichte

Den Grundstein zur Beobachtung der Erdrotation legte im 3. Jh. v. Chr. Aristarch von Samos⁹ mit seiner Vermutung, dass sich die Erde um ihre eigene Achse dreht. Obwohl

⁹Aristarch von Samos, griechischer Astronom und Mathematiker, 310 - ca. 230 v. Chr.

er damit natürlich Recht hatte, wurde seine Vorstellung für unsinnig erklärt und erst im Mittelalter wieder neu aufgegriffen und schließlich akzeptiert. Trotz einer falschen Weltvorstellung konnte im 2. Jh. v. Chr. erstmals ein Effekt der Präzession beobachtet werden. Hipparch von Nikäa¹⁰ schrieb von einer rückläufigen Bewegung des Frühlingspunkts. Erst 2000 Jahre später entdeckte James Bradley¹¹ die Nutationsperiode von 18,6 Jahren, kurz darauf folgte die theoretische Erklärung durch d'Alembert¹² bzw. Euler (1758). Weitere 100 Jahre danach schrieb Friedrich Wilhelm Bessel¹³ in einem Brief an Alexander von Humboldt¹⁴ von seinem „Verdacht gegen die Unveränderlichkeit der Polhöhe“ und diesbezüglichen Beobachtungen. Einige wissenschaftliche Publikationen dieser Zeit spiegeln ein schon sehr gutes theoretisches Wissen wider. Tisserand¹⁵ schrieb in seiner Abhandlung über die Himmelsmechanik [Tisserand, 1891] über die Polbewegung mit einem großen, prograden und einem kleinen, retrograden Kreis, die heute die Bezeichnungen Chandler- und Oppolzerbewegung tragen. Erstaunlich ist dabei die Abschätzung der Größenordnungen. Während für die freie Bewegung noch die heute verbesserte Eulerperiode mit 305 Tagen und 15 m Radius angegeben ist, erstaunt die gute Kenntnis über die kleinere, retrograde Bewegung, die mit 1 Tag und einer maximalen Amplitude von 60 cm beschrieben ist. Des Weiteren schrieb Tisserand in seiner Abhandlung über Auswirkungen von Massenvariationen durch die Meere und die Atmosphäre auf die Polbewegung. Ende des 19. Jh. unserer Zeit gelang Karl Friedrich Küstner die Beobachtung der Polbewegung, anhand welcher Seth Carlo Chandler 1892 die Hauptperiode zu 432 Tagen bestimmte. Im Jahre 1895 wurde der *International Latitude Service (ILS)* ins Leben gerufen, der seit 1899 regelmäßige Beobachtungen der Polbewegung durchführt. Ein wenig später, im Jahre 1912 folgte die Gründung des *Bureau International de l'Heure (BIH)* in Paris, das neben Polbewegungsbeobachtungen vor allem Untersuchungen für die genaue Bestimmung der *Universal Time (UT)* durchführte. Für die exakte Bestimmung der Rotationsrate der Erde, die die *UT* repräsentiert, wird die Umdrehungsdauer mit einem davon unabhängigen Zeitmaß verglichen. Vor der Erfindung der Atomuhr (1955) wurde dafür die *Ephemeridenzeit* verwendet, eine Zeitskala die auf Bahnrechnungen von Planeten basiert.

Nach der Umbenennung des *ILS* zum *International Polar Motion Service (IPMS)* 1962, wurde dieser im Jahre 1987 gemeinsam mit der Sparte Erdrotation des *BIH* durch den neu gegründeten *International Earth Rotation Service (IERS)*¹⁶ ersetzt. Er ist für die Bestimmung und Veröffentlichung der Erdorientierungsparameter, sowie für das zälestische und das erdfeste Referenzsystem, *ICRS (International Celestial Reference System)*

¹⁰Hipparch von Nikäa, griechischer Astronom, Geograph und Mathematiker, um 190-120 v. Chr.

¹¹James Bradley, englischer Geistlicher und Astronom, 1693-1762

¹²Jean-Baptiste le Rond d'Alembert, Mathematiker, Physiker und Philosoph, 1717 (in Paris) - 1783

¹³Friedrich Wilhelm Bessel, deutscher Astronom, 1784-1846

¹⁴Alexander von Humboldt, deutscher Naturforscher, 1769-1859

¹⁵François Félix Tisserand, französischer Astronom, 1845-1896

¹⁶seit 2003 steht die Abkürzung für *International Earth Rotation and Reference Systems Service*

bzw. *ITRS* (*International Terrestrial Reference System*), zuständig.

Auf der Website des *IERS*¹⁷ sind Erdrotationsparameter von 1846 bis heute, sowie Voraussagen für die nahe Zukunft, mit unterschiedlicher Genauigkeit und zeitlicher Auflösung, für jedermann frei zugänglich.

Die angegebenen Genauigkeiten reichen von einigen Zehntel Bogensekunden bei den alten, optisch-astronomischen Beobachtungen, bis zu wenigen Zehntel Millibogensekunden bei täglicher Auflösung mit den modernen geodätischen Weltraumverfahren.

Die Informationen Kapitel 5.1 wurden Rothacher [2003], Schuh und Mendes Cerveira [2007], Vicente [1979] sowie der Website des IERS entnommen. Für interessierte Leser/innen sind zwei weitere Veröffentlichungen von Vicente [1972 und 1980] zu empfehlen, in denen die wichtigsten Entwicklungen von Ende des 19. Jh. bis zur Veröffentlichung beschrieben sind.

5.2 Modellierung

Die heute gängigen Methoden zur Bestimmung der Erdrotation sind die so genannten *geodätischen Weltraumverfahren*. Dabei handelt es sich um relative Messmethoden, das heißt sie bestimmen die Erdrotation relativ zu einem Inertialsystem durch den Blick hinaus von der Erde. Genau genommen wird die Bewegung eines erdfesten, sich mitdrehenden Bezugssystems (*ITRS*), in dem sich die Messgeräte befinden, relativ zu einem zälestischen Bezugssystem (*ICRS*) bestimmt.

Das *International Celestial Reference System* (*ICRS*) bildet das Inertialsystem, auf das die Bewegung der Erde bezogen wird. Es wird durch die Positionen und Geschwindigkeiten von ausgewählten Quasaren¹⁸ realisiert. Diese bilden den aktuellen Bezugsrahmen, den *International Celestial Reference Frame* (*ICRF*). [Website ICRS]

Im Gegensatz zum ruhenden *ICRF* verändert der *International Terrestrial Reference Frame* (*ITRF*) ständig seine Lage im Raum. Als Realisierung des *International Terrestrial Reference System* (*ITRS*) ist er durch die Koordinaten von auf der ganzen Erdkugel verteilten Stationen an den Erdkörper gekoppelt und dreht sich mit diesem mit. Die zur Zeit verwendete Realisierung ist der *ITRF2000*, wobei dieser bald durch den *ITRF2005* ersetzt werden wird. [Website ITRF]

Für die herkömmliche Umrechnung eines Richtungsvektors \vec{r} zwischen dem zälestischen und dem erdfesten Koordinatensystem wird die Transformationsmatrix $T(t)$ berechnet, die sich aus fünf Teilmatrizen zusammensetzt:

¹⁷ www.iers.org

¹⁸ *Quasi stellar radio sources* sind Radioquellen im Weltraum die als äußerst stabil angenommen und mit der VLBI gemessen werden

$$\vec{r}_{ICRF}(t) = T(t) \cdot \vec{r}_{ITRF}(t) \quad (7)$$

$$T(t) = P \cdot N \cdot S \cdot X \cdot Y \quad (8)$$

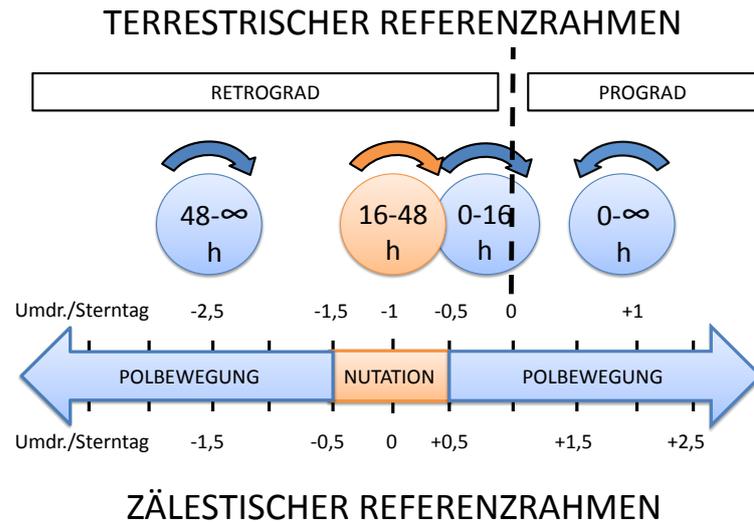
P und N stehen für die Präzession und Nutation der Erde, S ist der *Spin* und somit die momentane Drehstellung der Erde, und in X und Y stecken die terrestrischen Polkoordinaten. Eine detaillierte Beschreibung der mathematischen Zusammensetzung der Matrizen ist in Kapitel 8.3 zu finden.

Die geodätischen Messsysteme, die im nächsten Abschnitt genannt werden, liefern die für die Transformation benötigten fünf Parameter, die so genannten *Erdorientierungsparameter (EOP)*. Dies sind x_p und y_p für die Polkoordinaten, $dUT1$ als Rotationswinkel, sowie dX und dY , welches Zuschläge zum momentanen Nutationsmodell sind.

Die Matrix T , die die Umrechnung zwischen zwei Koordinatensystemen beschreibt, hat drei Freiheitsgrade und könnte somit die Lage der Erde mit drei voneinander unabhängigen Parametern beschreiben. Aufgrund von langer Tradition und Gewohnheit wird aber an der fünf-Parameter Methode festgehalten. Ein Vorteil davon ist, dass die auftretenden Bewegungen jeweils in dem Bezugssystem gemessen werden (ICRF bzw. ITRF) in dem sie besser erfassbar sind, d. h. langperiodische Veränderungen aufweisen. Der Nachteil in der Verwendung von fünf anstatt drei Parametern liegt darin, dass die fünf Anteile nicht voneinander unabhängig sind. Gleichung (9) zeigt den Zusammenhang im Frequenzbereich von einer Bewegung, die einerseits im zälestischen System und andererseits im terrestrischen System beschrieben wird. Dies bedeutet, dass z. B. eine Bewegung mit einer prograden, täglichen Periode im erdfesten Bezugssystem ($f_{ITRF} = +1$), vom himmelfesten System als Bewegung mit doppelter Frequenz ($f_{ICRF} = 1 + 1 = +2$) gesehen wird.

$$f_{ICRF} = f_{ITRF} + 1 \quad (9)$$

Beim Vordringen der Messmethoden in den subtäglichen Bereich kam es zu gravierenden Problemen bei der Zuordnung von gemessenen Polbewegungen einerseits zu den Polkoordinaten und andererseits zu den Nutationszuschlägen. Da die geodätischen Messverfahren allesamt nur die gesamte Rotationsmatrix bestimmen und nicht streng zwischen geophysikalischer und astronomischer Erdrotation unterscheiden können, mussten die aufgrund des Vordringens der Messverfahren in den subtäglichen Bereich auftretenden Redundanzen mithilfe einer willkürlichen Definition beseitigt werden. Der Unterschied zwischen der Nutation und der Polbewegung wurde im Frequenzbereich eindeutig festgelegt, wobei diese Trennung nicht theoretisch begründet, sondern reine Definition ist. Wie Abbildung 10 zu entnehmen ist, werden alle retrograden Bewegungen mit terrestrischen Perioden von 16-48 Stunden im zälestischen System, als Nutationszuschläge erfasst, alle anderen Frequenzbänder, prograd und retrograd, werden zur Polbewegung gezählt.



erstellt nach Fig. 1 in Gross [2007] bzw. Mendes Cerveira et al. [2007]

Abbildung 10: Definition der Polbewegung und der Nutation nach den IERS Konventionen 2003

Somit ist aber z. B. die tägliche, erzwungene retrograde Bewegung (Oppolzerbewegung) im Nutationsmodell bzw. in den Zuschlägen dX und dY enthalten, hochfrequente Nutationsschwankungen gehen hingegen in die Polkoordinaten ein.

Aufgrund dieser Vermischung zwischen tatsächlicher und definitionsmäßiger Polbewegung entspricht der verwendete Pol nicht dem tatsächlichen Erdrotationspol und die in den Erdorientierungsparametern enthaltenen Polkoordinaten x_p und y_p nicht den „echten“ Polkoordinaten. Abbildung 11 gibt eine Übersicht über die bei der herkömmlichen Transformation verwendeten Pole und ihren Zusammenhang. Geht man vom Pol des zälestischen Bezugssystems aus (P_{ICRF}), so gelangt man zuerst durch Anbringen des Präzessions-/Nutationsmodells zum so genannten *Initial Celestial Intermediate Pole* (CIP_0) und über die Nutationszuschläge (dX , dY) zum *Celestial Intermediate Pole* (CIP). Beginnt man vom terrestrischen System, so gelangt man mit der Polbewegung (x_p , y_p) vom Pol des ITRF (P_{ITRF}) zum CIP . Der CIP ist jener Pol, der durch die vom IERS veröffentlichten Erdorientierungsparameter bestimmt ist. Tatsächlich ist seine Lage allerdings nur durch die obige Definition festgelegt, und stimmt nicht mit dem wahren Rotationspol der Erde überein. Der „echte“ Pol wird *Instantaneous Rotation Pole* (IRP) genannt und repräsentiert den Durchstoßpunkt der momentanen Rotationsachse durch die Erdoberfläche nahe dem Nordpol. Als weiterführende Literatur, die sich mit der Unterscheidung zwischen Nutation und Polbewegung bzw. mit der Umrechnung zwischen den verwendeten Polen beschäftigt seien hier Gross [2007], Capitaine [2002] und Mendes Cerveira et al. [2007 und noch nicht veröffentlicht] genannt.

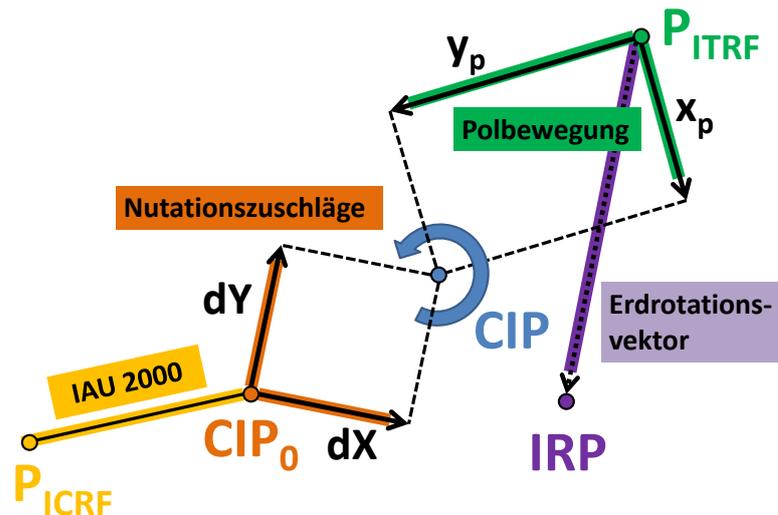


Abbildung 11: Übersicht der Referenzpole

5.3 Messgeräte

Nachdem bis 1970 die Erdrotation ausschließlich mit optisch-astronomischen Verfahren gemessen worden ist und die Beobachtungen teilweise mit großen systematischen Fehlern behaftet waren, dominieren heute die *geodätischen Weltraumverfahren*. Damit sind die Beobachtungsverfahren *Very Long Baseline Interferometry (VLBI)*, *Satellite Laser Ranging (SLR)* und *Lunar Laser Ranging (LLR)*, *Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite instrument (DORIS)*, sowie die *Global Navigational Satellite Systems (GNSS)*, wozu *GPS*, *GLONASS* und *GALILEO* zu zählen sind, gemeint. [Brzeziński, 2006] Noch nicht etabliert, aber mit großen Zukunftschancen für die Messung der subtäglichen Erdrotation, ist der Ringlaser (RL).

Jede dieser Methoden ist für die einzelnen Erdrotationsparameter besser oder schlechter geeignet, aber einzig mit der VLBI ist die Bestimmung der gesamten Transformationsmatrix über einen längeren Zeitraum mit zufriedenstellender Genauigkeit möglich.

In der vorliegenden Arbeit geht es im Wesentlichen um den Vergleich und die Verbindung von Messungen aus der VLBI und des Ringlasers, weshalb nur auf diese beiden Verfahren näher eingegangen wird.

5.3.1 VLBI

Die *Very Long Baseline Interferometry (VLBI)* ist die einzige Methode der geodätischen Raumverfahren mit der man alle fünf Erdorientierungsparameter unabhängig voneinander bestimmen kann und ist somit das Standardverfahren zur Messung der Erdrotation. Des Weiteren wird durch VLBI-Messungen der ICRF bestimmt.

Die VLBI ist ein Spezialverfahren der Radioastronomie. Mit einem globalen Netzwerk von Radioteleskopen werden von Quasaren zeitgleich ausgesandte Radiosignale empfangen und aufgezeichnet. Die Teleskope sind mit hoch genauen Uhren (z. B. Wasserstoff-Maser in Wettzell mit einer relativen Genauigkeit von besser als $2 \cdot 10^{-15}$ [Website Wettzell]) ausgestattet, mit denen die Messdaten während ihrer Aufzeichnung mit einem Zeitstempel versehen werden. In einem Großrechner (Korrelator) werden die Messdaten paarweise korreliert und für jede Basislinie eine Zeitdifferenz τ bestimmt, um die das Signal bei einem Teleskop später ankommt, als bei seinem Partnerteleskop. Mit τ , der eigentlichen Beobachtungsgröße, kann durch Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit c die Länge der geometrischen Differenz d berechnet werden (Abbildung 12). Daraus kann die Länge der Basislinie b , die dem Abstand der Teleskope entspricht, bestimmt werden, woraus man die relative Lage der Teleskope zueinander erhält. Durch den Vergleich einer Basislinie mit Ergebnissen aus vorausgegangenen Messungen erhält man die zeitliche Änderung und kann z. B. auf die Bewegungen der tektonischen Platten schließen. Als bekanntestes Beispiel hierfür sei die 6000 km lange transatlantische Basislinie von Wettzell (D) nach Westford (Massachusetts) genannt, die seit 1984 regelmäßig beobachtet wird und deren Trend die Rate der Plattenbewegung am transatlantischen Rücken widerspiegelt. Schließt man nun mehrere Antennen bzw. Basislinien zu einem Netz zusammen und kann alle lokalen und regionalen Variationen durch Modelle und gute Schätzungen eliminieren, so kann aus den momentanen Antennenpositionen und den Zeitdifferenzen des empfangenen identen Signals auf die Stellung der Erde relativ zu den Quasaren geschlossen werden. Somit können die aktuellen Erdorientierungsparameter bestimmt werden.

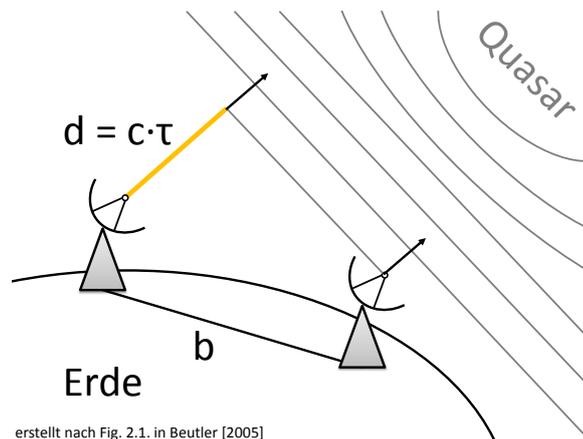


Abbildung 12: Grundprinzip VLBI

Ehe aber die interessierenden Parameter geschätzt werden können (z. B. mittels Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate), müssen noch eine Reihe von Korrekturen an die erhaltenen Zeitdifferenzen angebracht werden, wie in Abbildung 13 gezeigt ist.

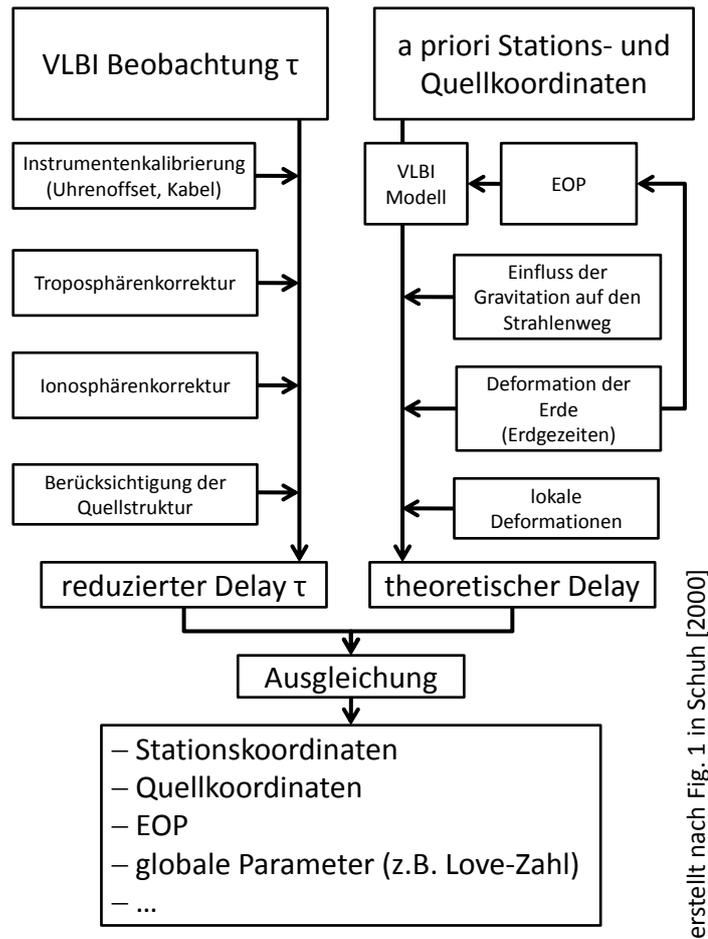


Abbildung 13: VLBI, geodätische Datenanalyse

Um aus einer VLBI Messung ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, müssen zuerst alle bekannten Einflussgrößen mittels geeigneter Modelle berücksichtigt oder durch zusätzliche, alternative Messmethoden bestimmt werden. Für die Beobachtungsgröße τ sind dies die Instrumentenkalibrierung der Antenne, insbesondere der Uhrenoffset und die Kabellaufzeit, die Verzögerung der Laufzeit durch die Atmosphäre, geteilt in eine Troposphären- und eine Ionosphärenkorrektur, sowie einer entsprechenden Korrektur für Instabilitäten der Radioquelle, d. h. des Quasars. Bei der korrigierten Messgröße spricht man von einem reduzierten Delay¹⁹, der anschließend mit dem theoretischen Delay verglichen wird. Der theoretische Delay ist die aus den bekannten Stations- und Quellkoordinaten berechnete Laufzeitverzögerung, unter Berücksichtigung lokaler und globaler Deformationen und Gezeiten. Bei völliger Korrektheit aller Modelle und ohne Messfehler müsste sie gleich dem reduzierten Delay sein. Da dies nicht der Fall ist, erfolgt ein oder mehrere Ausgleichungsschritt/e, und man erhält schließlich verbesserte Werte der Eingangsgrößen.

Als Ergebnis eines VLBI Experiments kann grundsätzlich jede der Einflussgrößen wäh-

¹⁹engl. delay = Verzögerung

rend der Ausgleichung mitgeschätzt werden, solange die Berechnung nicht singulär wird, d. h. ein Datum gegeben ist. Je nach Ziel des Experiments werden z.B. die Stations- und Quellkoordinaten während der Auswertung fixiert um die Erdrotationsparameter zu bestimmen, oder aber modellierte Erdorientierungsparameter verwendet, um Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten zu berechnen. Neben den geodätischen/astronomischen Parametern, zu denen die Länge der Basislinien, Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten, Erdorientierungsparameter sowie Radioquellenkoordinaten zählen, eignet sich die VLBI besonders gut zur Bestimmung globaler geodynamischer Parameter, wie z. B. die *Love Zahlen* als Elastizitätswert der Erde. Außerdem erhält man für jede Station die so genannten Hilfsparameter, womit z. B. Uhrenoffsets und ionosphärische bzw. troposphärische Korrekturen gemeint sind.

Die aufwändige Planung und Koordination der VLBI Messkampagnen wird vom *International VLBI Service for Geodesy and Astronomy (IVS)* durchgeführt, auf dessen Website²⁰ neben aller Art frei zugänglicher Messpläne, Daten und Ergebnisse auch Neuigkeiten über die technischen Weiterentwicklungen und den Ausbau des VLBI Netzes zu finden sind.

Das momentane IVS Netzwerk von geodätisch aktiven VLBI Antennen umfasst ca. 30 Stationen, die regelmäßig an Messungen teilnehmen. Als bekannte europäische Vertreter seien hier z. B. die Radioteleskope in Wettzell (D) und Onsala (SWE) genannt. Einer der aufwändigsten Schritte während eines VLBI Experiments ist noch das Senden der auf großen Festplatten aufgezeichneten Messdaten der einzelnen Antennen zu dem ausgewählten Korrelator wie z. B. Bonn (D). Dies geschieht größtenteils noch per Post und nur vereinzelt schon über das Internet. Die Auswertung wird von verschiedenen Analysezentren durchgeführt und deren Ergebnisse, die je nach verwendeter Software, Modelle und Korrekturen voneinander abweichen können, den Nutzern über die so genannten Datenzentren zur Verfügung gestellt.

[Sovers et al., 1998] [Schuh, 2000] [Beutler, 2005] [Website IVS]

5.3.2 Der Ringlaser

Neben der bisher betrachteten Möglichkeit, die Erdrotation mit relativen Methoden, also in Bezug zu einem Inertialsystem zu bestimmen, gibt es auch absolute Instrumente die auf die Erdrotation reagieren, ohne aus dem System Erde hinaus schauen zu müssen. Dazu zählen das Foucault'sche Pendel, mechanische Kreisel, Laserkreisel, Faserkreisel, supraleitende Gravimeter und das Heliumgyroskop [Klügel, 2003]. Einzig die Laserkreisel haben aber zur Zeit jene Stabilität und Genauigkeit erreicht, die für eine aussagekräftige Beobachtung von kurzperiodischen Erdrotationsschwankungen nötig sind.

²⁰<http://ivscc.gsfc.nasa.gov>

Bei einem Laserkreisel wird der so genannte Sagnac-Effekt ausgenutzt, nach dem in einem rotierenden, geschlossenen Lichtweg ein gegen die Rotation laufender Lichtstrahl einen kürzeren Weg als der mitlaufende zurückzulegen hat. Diese Differenz der Weglängen ist direkt proportional zu der auftretenden Frequenzänderung der Laserstrahlen, die mit ihrer geringen Wellenlänge eine extrem hohe Auflösung ermöglichen. Positioniert man nun einen Ringlaser auf der Erdoberfläche, so ist dieser der Rotationsbewegung der Erde ausgesetzt und somit auf Änderungen der auf ihn wirkenden Rotation direkt empfindlich. Würde man drei Ringlaser orthogonal zueinander aufstellen, so könnte der gesamte Erdrotationsvektor abgeleitet werden. Wird ein Ringlaser normal zur Erdrotationsachse positioniert, was einer Aufstellung an einem der Pole bedeuten würde, dann misst dieser die Drehgeschwindigkeit. Die einzige bisher realisierte Installation eines Ringlasers ist jedoch eine lokale horizontale Aufstellung. Damit erhält man jenen Anteil der Erdrotation, der sich aus der Projektion der Ringlaser-Flächennormale auf den Erdrotationsvektor ergibt.

Zur Zeit gibt es nur ganz wenige Ringlaser, mit denen die Erdrotation gemessen werden kann. Die mit Abstand besten Ergebnisse liefert der Großringlaser „G“ an der Fundamentalstation Wettzell in Deutschland, dessen Messdaten für diese Arbeit verwendet wurden (Abbildung 14).

Der Ringlaser in Wettzell ist seit Oktober 2001 in Betrieb und wurde speziell für die Beobachtung der Erdrotation entwickelt. Die laut Website der Fundamentalstation Wettzell²¹ gesteckten Ziele für die Beobachtung der Erdrotation mit dem Ringlaser sind:

„Die Erfassung von Änderungen in der Drehgeschwindigkeit der Erde mit einer Genauigkeit von 10^{-9} bezüglich der Tageslänge, bzw.

die Echtzeiterfassung vor Ort mit einer zeitlichen Auflösung von unter 1 Stunde.“

Die technische Auslegung wurde aus den Erkenntnissen zweier in Neuseeland positionierter Prototypen (C-II bzw. G-0) festgelegt. Der Großringlaser „G“ hat eine effektive Umlaufläche von $4 \times 4 = 16 \text{ m}^2$ und besteht aus der thermisch sehr stabilen Glaskeramik Zerodur. Er ist in einem von äußeren Einflüssen weitgehend geschützten Tiefenlabor auf einem Granittisch streng horizontal positioniert, welcher durch Betonpfeiler in ca. 10 Meter Tiefe auf massivem Fels gegründet ist. Um den Ringlaser auch thermisch stabil zu halten, kann das Tiefenlabor nur durch einen unterirdischen Zugang und eine Schleuse betreten werden, was aber nur im Zuge von Reparatur- oder Erweiterungsarbeiten geschieht. Ein mit einem Helium/Neon Gasgemisch gefülltes, über 4 hochqualitative Spiegel führendes Röhrensystem bildet ein schwingfähiges System, einen so genannten Ringresonator. Er wird an einer Stelle in beide Richtungen zum Lasern angeregt, die beiden Lichtstrahlen

²¹ www.fs.wettzell.de

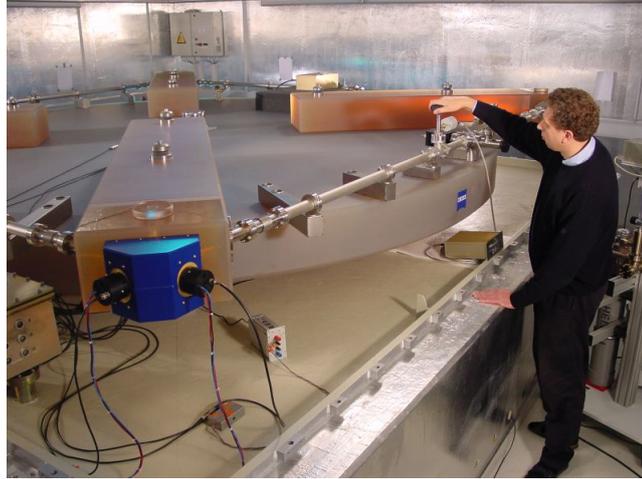


Abbildung 14: Ringlaser „G“ in Wettzell [Quelle: Fundamentalstation Wettzell]

werden dann an einem der Spiegel umgelenkt und überlagert und mittels einer Fotodiode als Sagnac-Signal registriert.

Betrachtet man die Grundgleichung der Sagnac-Interferometrie

$$\Delta f = \frac{4 \cdot A}{\lambda \cdot L} \cdot \vec{n} \cdot \vec{\Omega} \quad (10)$$

mit der Umlaufläche A , dem Umfang des Lichtweges L , der Wellenlänge λ und dem Produkt des Normalenvektors \vec{n} mit der Rotationsachse $\vec{\Omega}$, so ist ersichtlich, dass eine Änderung des Winkels zwischen \vec{n} und $\vec{\Omega}$ und somit der effektiv wirksamen Rotationsachse, direkt als Änderung der Sagnacfrequenz messbar ist. Eine Winkeländerung erfolgt einerseits durch eine Änderung der Rotationsachse $\vec{\Omega}$, sowohl in der Tageslänge als auch in ihrer Position, als auch durch eine Änderung der Ringlasernormalen \vec{n} infolge von lokalen Effekten. Aber auch eine Veränderung in den anderen Parametern, die vorwiegend die Systemeigenschaften des Ringlasers betreffen, schlägt sich in Δf nieder und muss daher ausgeschlossen bzw. durch weitere Sensoren mitgemessen und eliminiert werden (siehe Abbildung 15).

Mit lokalen Orientierungsänderungen sind alle Effekte gemeint, die die Position und Orientierung des Ringlasers am Aufstellungsort verändern und sich somit auf das Messsignal auswirken. Dazu zählen Verschiebungen aufgrund der festen Erdzeiten und Ozeanzeiten, Auswirkungen von atmosphärischen Auflasten, sowie lokale Bewegungen des Untergrunds. Zur Bestimmung der lokalen Orientierungsänderungen wird ein System von Neigungsmesser eingesetzt, das sich allerdings nicht wie das Sagnac-Signal auf die Winkeländerung der Ringlaserebene bezüglich der Erdrotationsachse, sondern auf die Lotrichtung bezieht. Um die Zeitreihe des Ringlasers mit den Daten der Neigungsmesser korrigieren zu können, müssen diese noch vom Einfluss des Schwerevektors bereinigt werden,

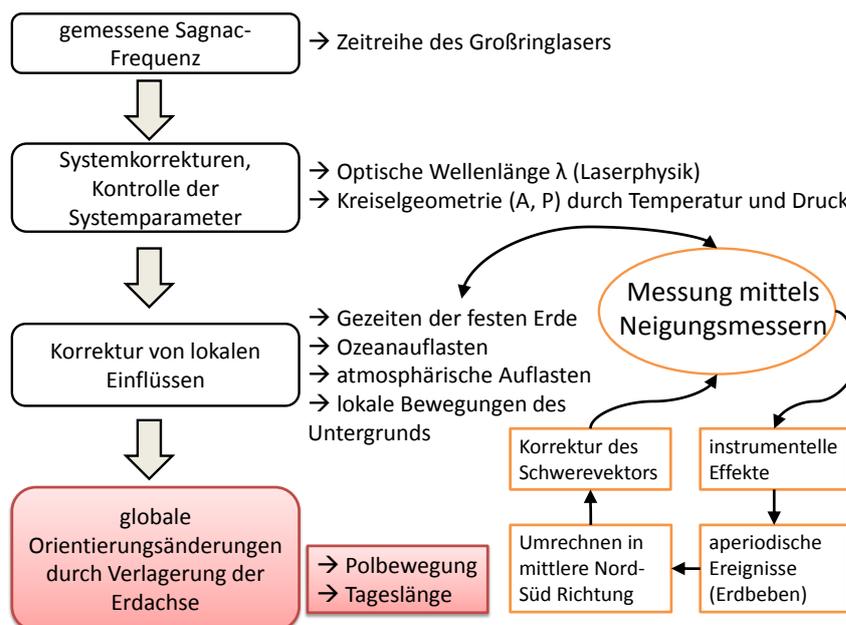


Abbildung 15: Korrekturen für die Zeitreihe des Ringlasers

was durch die Modellierung von atmosphärischen und hydrologischen Attraktionseffekten anhand von Wettermodellen geschieht. Die von etwaigen Systemeigenschaften und den lokalen Änderungen bereinigte Zeitreihe enthält dann der Theorie nach nur mehr globale Orientierungsänderungen infolge der Bewegung der Erdrotationsachse. Mit dem bisher erreichten Auflösungsvermögen können die 7 größten Amplituden der Oppolzerbewegung der Erdachse im erdfesten System in den Messreihen des Ringlasers eindeutig erkannt werden, die Chandler- und jährliche Bewegung sind jedoch nicht von der Instrumentendrift zu unterscheiden. Zur Messung kleinerer Schwankungen der Erdrotation reicht die Genauigkeit der Ringlaser noch nicht aus. Als Grenzen hierfür werden 0,5 mas für subtägliche periodische Signale der Polbewegung und 0,2 ms für die Variation der Tageslänge angegeben.

Obwohl die Stabilität und das Auflösungsvermögen des Ringlasers bei einigen Modifikationen im Jahr 2006 erheblich gesteigert werden konnte, sind die theoretischen technischen Möglichkeiten noch nicht ausgeschöpft und es ist eine weitere Verbesserung möglich.

Aktuelle Informationen über den Großringlaser in Wettzell, sowie Plots der momentanen Messungen sind auf der Website der Station Wettzell zu finden.

Hilfreich beim Verfassen dieses Kapitels über den Ringlaser (5.3.2) waren die Veröffentlichungen von Chao [1991], Klügel [2003], Klügel et al. [2006 und 2008], Schreiber et al. [2003 und 2004] sowie die umfangreichen Beschreibungen auf der Website der Station Wettzell.

5.3.3 Ein Vergleich von VLBI und RL

Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von VLBI und des Ringlasers. Die VLBI ist zur Zeit das Standardverfahren zur Bestimmung der Erdrotation und wird es mit Sicherheit noch lange Zeit bleiben. Sie besticht durch eine hohe Genauigkeit (besser als 1 mas) und ist auch über lange Zeiträume äußerst stabil. Obwohl die VLBI zu den modernen Messmethoden zählt, kann sie bereits auf eine gewisse Tradition zurückgreifen. Mittlerweile steht schon gutes Datenmaterial auch über die längeren Perioden (z. B. Nutationsperiode von 18,6 Jahren) zur Verfügung, aus dem man sich neue Erkenntnisse über langzeitliche Veränderungen erhofft. Der Nachteil der VLBI ist die Schwierigkeit bei der Trennung von Polbewegung und Nutation bzw. die aufwändige Planung und Messung selbst, wodurch zur Zeit nur selten kontinuierliche Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden.

Tabelle 1: Gegenüberstellung von VLBI und RL

	VLBI	Ringlaser
Was	misst Signale von Quasaren und bestimmt die gesamte Transformationsmatrix zwischen ICRF und ITRF	misst die Winkeländerung zwischen der Ringlaserebene und der Erdrotationsachse
Genauigkeit, Auflösung	bestimmt eine mittlere Polachse auf einige Zehntel Millibogensekunden mit einer zeitlichen Auflösung im Stundenbereich	1 ms für LOD, 2 mas für Polbewegung; Auflösung < 1 Stunde möglich z. Z...: deutliche Erkennung von täglicher Polbewegung
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - sehr genau - über langen Zeitraum stabil - Standardmethode 	<ul style="list-style-type: none"> - Permanentmessung - Messung der Änderung des momentanen ERV - beinahe Echtzeit
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - ist nicht empfindlich für die echte Erdrotationsachse - zur Zeit keine kontinuierliche Messung - Netzmessung mit aufwändiger Planung und Koordination 	<ul style="list-style-type: none"> - über längeren Zeitraum instabil - große Abhängigkeit von lokalen Einflüssen

Aus der Verwendung des Ringlasers zur Messung der Erdrotation erhofft man sich besonders im subtäglichen Bereich neue Erkenntnisse. Die kontinuierliche Messung, in beinahe Echtzeit, stellt eine große Chance für einen Fixplatz unter den Messverfahren der Erdrotation dar. Die größten Schwächen liegen in der großen Abhängigkeit von lokalen Effekten und der Instabilität über einen längeren Zeitraum.

Einer der größten Vorteile in der Verwendung zweier unabhängiger Messverfahren zur Bestimmung desselben Phänomens ist jedoch die gegenseitige Kontrolle und bis jetzt nicht dagewesene Möglichkeit der Aufdeckung etwaiger System- oder Modellfehler.

Teil II

Ausarbeitung

6 Problemstellung

Der Grundgedanke aus dem diese Diplomarbeit entstanden ist, war, die momentane Erdrotation im subtäglichen Bereich mit einer gemeinsamen Auswertung von VLBI und Ringlaserdaten zu bestimmen. Einerseits sollen die sehr genauen und stabilen Messreihen der VLBI durch die hochfrequenten Messungen des Ringlasers im subtäglichen Bereich erweitert werden und andererseits der noch ziemlich instabile und mit einer hohen Drift-rate behaftete Ringlaser durch die VLBI stabilisiert werden. Die Schwierigkeit liegt dabei darin, dass sich VLBI und Ringlaser in ihrer Messmethode grundsätzlich unterscheiden. Das relative System, das für die gesamte Transformationsmatrix zwischen terrestrischem und zälestischem System empfindlich ist, und andererseits der Ringlaser, der sensitiv auf die tatsächliche Bewegung der Erdachse in Bezug zum terrestrischen System reagiert. Die VLBI kann nicht zwischen astronomischer und geophysikalischer Erdrotation unterscheiden und insbesondere die dominierende tägliche Polbewegung (Oppolzerbewegung), die in den Zeitreihen des Ringlasers eindeutig zu erkennen ist, nicht von der Nutation separieren. Will man nun beide Zeitreihen miteinander vergleichen, so muss zuerst sichergestellt werden, dass sie die gleichen Signale und Bewegungen enthalten.

Kapitel 6.1 gibt eine Vorstellung der bisherigen Lösungsansätze dieses Problems und repräsentiert den aktuellen Stand der Wissenschaft in diesem Bereich.

6.1 Was heute möglich ist

Mit den geodätischen Weltraumtechniken, allen voran VLBI gelingt die Bestimmung der Orientierung einer mittleren Polachse der Erde im Raum und relativ zum Erdkörper mit einer täglichen bis halbstündlichen Auflösung bis unter einer Zehntel Millibogensekunde (3 mm) [Mendes Cerveira et. al., 2008]. Geophysikalische und geodynamische Modelle der Erdrotation und ihrer Schwankungen beziehen sich jedoch nicht auf eine mittlere Polachse, sondern auf den momentanen Erdrotationsvektor. Um die Modelle dennoch verwenden zu können, muss die beobachtete geodätische Polbewegung (x_p, y_p) in Komponenten des geophysikalischen Erdrotationsvektors (m_x, m_y) umgerechnet werden. Dazu werden linearisierte Gleichungen 1. Ordnung verwendet, die nur für kleine Polbewegungen Gültigkeit haben.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} x_p - \frac{1}{\Omega_N} \dot{y}_p \\ -y_p - \frac{1}{\Omega_N} \dot{x}_p \end{pmatrix} \quad (11)$$

Als Variablen gehen dabei neben den Polkoordinaten auch ihre zeitliche Ableitung (\dot{x}_p , \dot{y}_p) sowie die mittlere Winkelgeschwindigkeit der Erde Ω_N ein. Der Einfluss der Nutation auf die Bewegung des Erdrotationsvektors wird nicht berücksichtigt.

Mit dem zur Zeit genauesten Ringlaser, dem Großringlaser „G“ in Wettzell, kann die Veränderung der Erdrotation im terrestrischen Bezugssystem mit einer Auflösung von 10^{-8} bestimmt werden, entsprechenden 2 mas an der Erdoberfläche [Klügel et. al., 2006]. Für langfristige, sowie sehr kleine Variationen, ist der Ringlaser im Moment noch nicht stabil bzw. sensibel genug, die relativ große, tägliche retrograde Bewegung ist allerdings eindeutig erkennbar. Da die dazu korrespondierenden Oppolzerterme jedoch noch durch kein anderes Messverfahren direkt gemessen werden konnten, können die Zeitreihen des Ringlasers nur mit Modellen zur Berechnung dieser Bewegung verglichen werden. Dabei konnte eine ausgezeichnete Übereinstimmung in den vorkommenden Frequenzen festgestellt werden, in einigen Amplituden traten jedoch noch Abweichungen auf, die bisher nicht erklärbar waren. Die Ursachen für diese Differenzen zu finden, ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Neben einer eventuell noch unzureichend genauen Trennung der Erdrotationskomponente von den lokalen Einflüssen in den Ringlaserdaten, könnte eine weitere Fehlerquelle eine falsche oder auch nur unterschiedliche Verwendung modellhafter Korrekturen, z. B. für die zonalen Erdzeiten und die Ozeangezeiten, sein.

Der mathematische Formalismus für die Kombination von gemessener, relativer Änderung der Sagnacfrequenz mit der von der VLBI gemessenen geodätischen Polbewegung wurde kürzlich von Mendes et al. vorgelegt und demnächst veröffentlicht [Mendes Cerqueira et. al., 2008]. Dabei wird stets das Nutationsmodell als fehlerfrei angenommen und während der Auswertung für den subtäglichen Bereich fixiert.

7 Idee

Mit der VLBI wird die gesamte Orientierungsmatrix der Erde erfasst und somit auch jener Teil, für den der Ringlaser empfindlich ist. Die Idee war nun, aus den mit VLBI gemessenen Erdorientierungsparametern jene Terme herauszufiltern, die mit dem Ringlaser gemessen werden, das heißt, aus der geodätischen und astronomischen Polbewegung die geophysikalische zu berechnen.

Dazu wird zunächst aus den VLBI Ergebnissen (EOP) die gesamte Transformationsmatrix zwischen ITRF und ICRF berechnet und somit die Trennung in einen zälestischen und einen terrestrischen Teil rückgängig gemacht. Bei Kenntnis der Änderung dieser Matrix mit der Zeit, kann daraus die Bewegung der momentanen Rotationsachse im terrestrischen System berechnet werden [vgl. z. B.: Nothnagel, 1991]. Für die praktische Berechnung wird die zeitliche Ableitung der Transformationsmatrix durch Bildung mehrerer Differenzenquotienten approximiert. Aus den somit berechneten Komponenten des

Erdrotationsvektors erfolgt schließlich die Umrechnung in die, diesen Bewegungen entsprechende, relative Änderung der Sagnacfrequenz an der Station Wettzell. Somit können die mit VLBI erhaltenen Erdorientierungsparameter mit den Zeitreihen des Ringlasers kombiniert und verglichen werden.

8 Realisierung

Für die Berechnung der Komponenten des momentanen Erdrotationsvektors wurde ein MATLAB Programm erstellt, das den Namen ERV.m trägt. Aus einer Tabelle mit Werten der Erdorientierungsparameter ($x_p, y_p, dUT1, dX, dY$), z. B. die täglichen Lösungen des IERS, wird, den Formalismen der IERS Konventionen folgend, die Transformationsmatrix zwischen dem terrestrischen und dem zälestischen System gebildet. Notwendig dafür ist unter anderem die Implementierung des Präzessions-/Nutationsmodells IAU 2000A, für das ebenfalls eine MATLAB Routine geschrieben wurde. Für die Berechnung des Erdrotationsvektors aus der Transformationsmatrix wird deren zeitliche Ableitung benötigt. Bei der Berechnung von \dot{T} gab es die größten Schwierigkeiten, da es durch die schnelle Änderung der Matrix aufgrund der Erdrotation bei der Berechnung des Differenzenquotienten zu numerischen Problemen kam, was zu großen Sprüngen im Verlauf der zeitlichen Änderung der Matrix führte. Eine Lösung dafür konnte durch die geteilte Berechnung der zeitlichen Variation gefunden werden, näheres dazu ist dem Kapitel 8.4 zu entnehmen. Aus der Transformationsmatrix und ihrer zeitlichen Ableitung kann schließlich der jeweilige Erdrotationsvektor gewonnen werden und für den Vergleich mit den Ringlaserdaten in die entsprechende relative Änderung der Sagnacfrequenz für die Station Wettzell umgerechnet werden.

Wichtige Anhaltspunkte und Vergleichswerte während der Realisierung des Programms waren die Konventionen des IERS, die Website des EOP Produktzentrums²² mit ihrem online-tool zur Berechnung des Rotationsvektors²³, sowie die persönliche e-Mail Korrespondenz mit dem Verfasser dieses Tools, C. Bizouard.

Das hier entwickelte Berechnungsprogramm ist so aufgebaut, dass es von jedem Benutzer möglichst einfach und vielseitig verwendet werden kann, ein Einblick in die bereits damit erzielten Ergebnisse ist im Teil III zu finden. In den anschließenden Kapiteln (8.1-8.9) wird zunächst auf die Funktionsweise und Verwendung des Programms eingegangen und anschließend der verwendete Formalismus mit den verschiedenen Modellen erläutert.

²²<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>

²³<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/products/matrice/matrice.html>

8.1 Das Programm ERV.m

8.1.1 Beschreibung

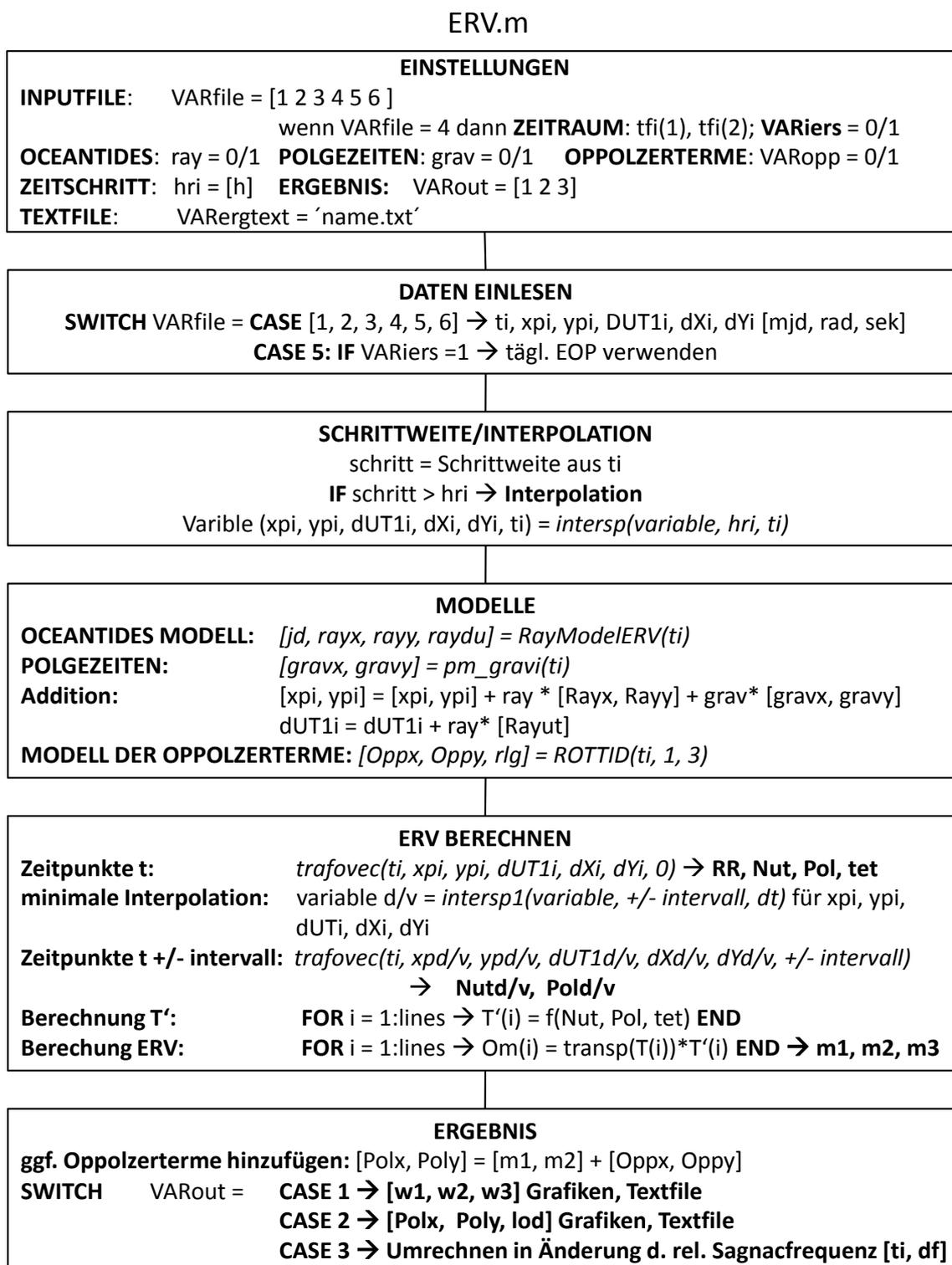


Abbildung 16: Flussdiagramm des Programms ERV.m

Das Programm `ERV.m` wurde mit der Rechensoftware MATLAB, Version 7.5.0 erstellt. Für einen Aufruf sind prinzipiell keine Eingangswerte notwendig, die jeweiligen Einstellungen können im Anfangsteil getätigt werden. Während der Berechnung werden einige Unterprogramme aufgerufen, die in Kapitel 8.1.2 aufgelistet und beschrieben sind. Der Ablauf des Programms ist in Abbildung 16 in Form eines Flussdiagramms dargestellt und soll nun kurz beschrieben werden:

Das Programm beginnt mit einem Abschnitt, in dem die spezifischen Eingaben für die gewünschte Berechnung getätigt werden. Zuerst gibt der/die Benutzer/in eine Zahl für das gewählte *Inputfile* an, in welchem die Erdrotationsparameter für einen gewissen Zeitraum gespeichert sind. Momentan stehen fünf verschiedene Datensätze zur Auswahl, die in Tabelle 2 angeführt sind.

Tabelle 2: Auszuwählende Datenfiles im Programm *ERV.m*

	Zeitraum	Auflösung	Beschreibung
1	17.-25.7.2007	täglich	EOP C04 (IAU2000A), IERS
2	16.-30.10.2002, 18.00	täglich	CONT02, VLBI-Auswertung, R. Haas, Onsala
3	16.-30.10.2002, 18.00	stündlich	CONT02, VLBI-Auswertung, R. Haas, Onsala
4	beliebig (ab 1.1.1992)	täglich	Standard Rapid EOP Daten (IAU2000A), IERS
5	12.-26.9.2005, 17.00	täglich	CONT05, VLBI-Auswertung, R. Haas, Onsala
6	12.-26.9.2005, 17.00	stündlich	CONT05, VLBI-Auswertung, R. Haas, Onsala

Die sechste Möglichkeit besteht darin, auf Messwerte der fünf Erdorientierungsparameter zu verzichten und den Rotationsvektor rein aus dem Nutationsmodell zu berechnen. Durch das Setzen der entsprechenden Variable auf „4“, kann durch Setzen der Variablen $t_{fi}(1)$ und $t_{fi}(2)$ als Anfangs- bzw. Endzeitpunkt die Berechnung für jeden beliebigen, sinnvollen Zeitraum durchgeführt werden. Setzt man die Variable $VARiers$ auf „1“, so werden die Erdorientierungsparameter des IERS für den gewählten Zeitraum mit einbezogen. Dabei handelt es sich um die *Standard Rapid EOP* Daten seit 1. Jänner 1992 bis einschließlich 3. April 2008, die für jeden Tag einen Satz der benötigten Parameter liefern. Aber auch die Verwendung alternativer Datenfiles ist keine Schwierigkeit, es muss nur sichergestellt werden, dass im Abschnitt „Daten einlesen“ ein Zeitvektor t_i in der Einheit des modifizierten Julianischen Datums und die Variablen x_{pi} , y_{pi} (*Polbewegung*), $dUT1i$, dXi und dYi (*Nutationszuschläge*) in Radiant bzw. Sekunden definiert werden. Die Daten müssen zu äquidistanten Zeitpunkten erfasst worden sein.

Als nächstes muss entschieden werden, welche zusätzlichen Modelle verwendet werden sollen. Mit „1“ bzw. „0“ können die ozeanischen Gezeiten, die Polgezeiten und die Opolzerterme hinzugenommen bzw. weggelassen werden. Ein entscheidender Punkt ist die Wahl des Zeitschrittes. Er wird in der Einheit Stunden eingegeben. Schließlich kann noch zwischen drei verschiedenen Darstellungsformen der Ergebnisse gewählt werden, „1“ gibt

den Erdrotationsvektor aus, „2“ seine Umrechnung in die entsprechenden Komponenten der Polbewegung m_x , m_y und LOD , und bei „3“ wird das Ergebnis in die entsprechende Variation der relativen Sagnacfrequenz für Wettzell umgerechnet. Die Ausgabe erfolgt in einigen Grafiken, sowie in einer Textdatei, die den gewählten Namen trägt. Nachdem alle Einstellungen gemacht worden sind, kann die Berechnung gestartet werden.

Zuerst wird das ausgewählte Datenfile aufgerufen und die Variablen für den Zeitvektor, die Polbewegung, dUT1 und die Nutationszuschläge erstellt. Aus dem Zeitvektor wird das Zeitintervall der gegebenen Parameter bestimmt und mit der gewünschten zeitlichen Auflösung verglichen. Ist die gewählte Schrittweite kleiner, so werden die Parameter mittels der Funktion *intersp* bzw. *interspt* durch eine Splineinterpolation in dem gewünschten Intervall verdichtet. Es folgt die Erweiterung der Erdorientierungsparameter um die subtäglichen Variationen. Der Einfluss der ozeanischen Gezeiten auf die Polbewegung wird mit der Funktion *RayModelERV* berechnet, jener der Polgezeiten mit der Subroutine *pm_gravi*. Dabei handelt es sich um Variationen, die bei der Bestimmung von täglichen Werten der Erdorientierungsparameter üblicherweise herausgerechnet werden und für eine subtägliche Auswertung wieder miteinbezogen werden müssen. Des Weiteren werden mit der Funktion *ROTTID* die Oppolzerterme berechnet. Diese beziehen sich allerdings auf die wahre Rotationsachse und können, wenn ausgewählt, erst nach der Berechnung des Erdrotationsvektors an die Komponenten m_x und m_y angebracht werden. Die Berechnung des Erdrotationsvektors und somit das Herzstück des hier beschriebenen Programms erfolgt in fünf Schritten. Ein wichtiger Teil wird dabei vom Unterprogramm *trafovec* durchgeführt, mit dem für die interessierenden Zeitpunkte die jeweilige Transformationsmatrix samt ihren Teilmatrizen berechnet werden können. *Trafovec* wird zuerst für den Zeitvektor t_i ausgeführt, und man erhält ein Array von den entsprechenden Transformations-, Nutations-, Polmatrizen und des Erddrehungswinkels Θ . Um auch die zeitliche Ableitung der Transformationsmatrix berechnen zu können, werden für einen kurzen Zeitraum vor bzw. nach den Stützpunkten aus t_i , mit der Funktion *intersp1*, Werte der Eingangsparameter interpoliert. Das durch ausgiebiges Erproben gefundene, standardmäßige Zeitintervall beträgt 1 Sekunde, kann aber im Abschnitt „Konstanten/intervall“ geändert werden. Für diese neuen Zeitpunkte wird erneut die Subroutine *trafovec* ausgeführt und die jeweiligen Nutationsmatrizen und Polmatrizen abgespeichert. Die Berechnung von \dot{T} wird in einer Schleife über alle Zeitpunkte t_i durchgeführt. Schließlich folgt, ebenfalls in einer Schleife über den Zeitvektor, die Berechnung der Orientierungsmatrix und den daraus leicht abzuleitenden Größen des Erdrotationsvektors.

Schließlich werden gegebenenfalls die Oppolzerterme abgezogen, ehe das Ergebnis in den unterschiedlichen Möglichkeiten präsentiert und in einer Textdatei gespeichert wird.

8.1.2 Unterprogramme

ERV.m verwendet eine Reihe von Unterprogrammen und Funktionen, die hier angeführt und teilweise kurz beschrieben sind.

trafovec.m dient der Berechnung der momentanen Orientierungsmatrix. Die Eingangswerte sind ein Zeitvektor, die fünf Erdorientierungsparameter, sowie ein kleines Zeitintervall als Abweichung von den gegebenen Zeitpunkten.

Wie Abbildung 17 zeigt, das ein Flussdiagramm dieser Routine darstellt, müssen zuerst die interessierenden Zeitpunkte in die benötigten Einheiten umgerechnet werden. Dies ist einerseits die terrestrische Zeit (*Terrestrial Time*), ausgedrückt in Julianischen Jahrhunderten, und andererseits der Zeitpunkt in der Weltzeit UTC unter Berücksichtigung der aktuellen Abweichung dUT1. Ein hierfür verwendetes Unterprogramm ist *tai_utc.m*, das den Unterschied zwischen der Atomzeitskala und der koordinierten Weltzeit angibt. Als Nächstes folgt mittels *iau2000a.m* die Berechnung der Präzessions-/Nutationsgrößen X , Y und S für den gesamten Zeitvektor. Die Berechnung der Drehmatrizen erfolgt in einer Schleife über den Zeitvektor. Aus Poldrehungs-, Erddrehungs- und Nutationsmatrix wird die gesamte Drehmatrix zusammengestellt. Als Ergebnis erhält man ein Array, das für jeden Zeitpunkt die gesamte Transformationsmatrix, die Matrizen für die Polbewegung und für die Nutation, sowie den jeweiligen Erddrehungswinkel Θ enthält.

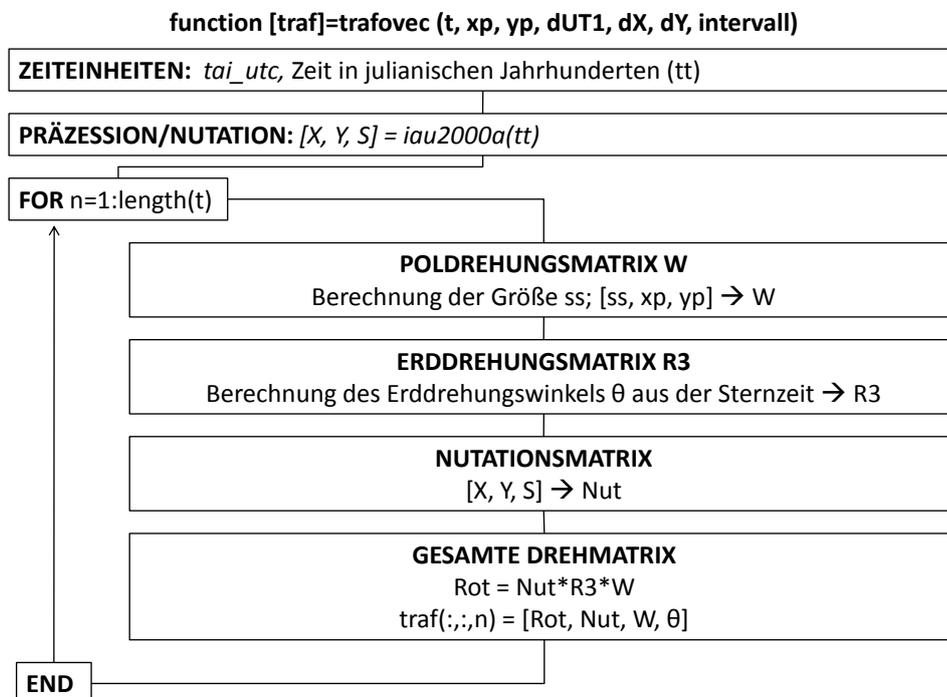


Abbildung 17: Flussdiagramm von *trafovec.m*

iau2000a.m berechnet nach dem Präzessions-/Nutationsmodell IAU2000A die jeweiligen Komponenten X , Y und S für einen Zeitvektor. Die benötigten Koeffizienten sind in den Tabellen

table52aj0.txt	table52bj0.txt	table52cj0.txt
table52aj1.txt	table52bj1.txt	table52cj1.txt
table52aj2.txt	table52bj2.txt	table52cj2.txt
table52aj3.txt	table52bj3.txt	table52cj3.txt
table52aj4.txt	table52bj4.txt	table52cj4.txt

gespeichert. Die Delaunay'schen Argumente werden mit der Funktion *delaunay_ru.m* berechnet. Dieses Programm benötigt sehr viel Rechenzeit und kann bei Berechnungen über einen großen Zeitvektor zu einer längeren Wartezeit führen.

$$\text{function } [X, Y, S] = \text{iau2000a}(mjd)$$

RayModelERV.m ist ein Programm zur Berechnung des Einflusses der ozeanischen Gezeiten auf die Polbewegung. Es wurde von R. Haas, basierend auf Ray bzw. Eanes programmiert und für die Verwendung in ERV.m in der Anwendung adaptiert. Die Berechnung der Korrekturen für x_p , y_p und $UT1$ erfolgt anhand der implementierten tabellarisch angeordneten Koeffizienten multipliziert mit den Delaunay'schen Argumenten, die wiederum mittels *delaunay_ru.m* erhalten werden.

$$\text{function } [t, dx, dy, du] = \text{RayModelERV}(t)$$

pm_gravi.m wurde von Bizouard bzw. Mendes Cerveira programmiert und liefert die täglichen, lunisolar verursachten Effekte auf die Polbewegung, die auch kurz Polgezeiten genannt werden. Die Berechnung der Korrekturen für x_p und y_p durch Eingabe des interessierenden Zeitraums in MJD erfolgt mithilfe der fundamentalen lunisolaren Argumente.

$$\text{function } [cor_x, cor_y] = \text{pm_gravi}(rjd)$$

ROTTID.m ist die von Mendes Cerveira erstellte MATLAB Version der Fortran Routine zur Berechnung der täglichen, lunisolar verursachten Bewegung des Erdrotationsvektors von Brzeziński. Als externes Programm wird *FARGPM.m* aufgerufen, welches zur Berechnung der Brown'schen Argumente dient. Hier wird *ROTTID* zur Berechnung der Oppolzerterme verwendet, und mit den Einstellungen „1“ für die Rotationsachse als Bezugsachse und „3“ für das Modell mit flüssigem Erdkern aufgerufen.

$$\text{function } [mx, my, rlg] = \text{ROTTID}(rmjd, naxis, model)$$

Basisfunktionen Alle weiteren, nicht standardmäßig in MATLAB vorhandenen, verwendeten Funktionen, können als geodätische Basisfunktionen betrachtet werden und sind am Besten in einem eigenen Ordner gespeichert, der mit dem Hauptprogramm verknüpft werden kann. Um eine vollständige Dokumentation zu gewährleisten, sind sie hier angeführt:

<i>Name.m</i>	<i>Kurzbeschreibung</i>
darst	grafische Darstellung (Figur) zweier Zeitreihen
deg2rad	Umrechnung von Grad in Radiant
delaunay_ru	Berechnung der Delaunay Argumente für einen Zeitvektor
dpsideps_dXdY	Umrechnung zwischen den Himmelspolkoordinaten ($d\psi$, $d\epsilon$) und (dX , dY)
einlc02	Einleseroutine für das Datenfile CONT02
einlc05	Einleseroutine für das Datenfile CONT05
einl_iers_daily	Einleseroutine für die täglichen Lösungen des IERS
FARGPM	Berechnung der Brown'schen Argumente in ROTTID
intersp	Splineinterpolation mit wählbarem Zeitschritt
intersp1	Splineinterpolation für 1 Intervalllänge vor bzw. nach dem Eingangszeitpunkt
interspt	Splineinterpolation mit wählbarem Zeitschritt für den Zeitvektor
modjuldat	Umrechnung eines Zeitpunktes im gregorianischen Datum UTC in MJD
rad2sec	Umrechnung von Radiant in Bogensekunden
sec2rad	Umrechnung von Bogensekunden in Radiant
tai_utc	Unterschied TAI-UTC für einen Zeitpunkt in MJD

Des Weiteren werden folgende Konstanten verwendet:

$$\begin{aligned} \text{nominale Winkelgeschwindigkeit der Erde:} & \quad \Omega_N = 7,2921151467064 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \\ \text{Verhältnis mittlerer Sonnentag / mittlerer Sterntag:} & \quad f = 1,00273781191135448 \end{aligned}$$

8.2 Formalismus

Nach der Vorstellung der verwendeten Programme soll nun auf den eigentlichen Rechengang, den mathematischen Formalismus eingegangen werden.

Bei dem vorliegenden Problem handelt es sich um zwei Bezugssysteme, ein ortsfestes zälestisches System (CRS) und das sich relativ dazu bewegende erdgebundene System

(TRS). Der Zusammenhang zwischen der Beschreibung eines im terrestrischen System fixierten Ortsvektors im TRS und im CRS ist über die in Teil I, Gleichung (8) beschriebene Transformationsmatrix T gegeben. Die zeitliche Veränderung des Vektors \vec{r}_{CRS} im zälestischen System erhält man durch Differenzieren der Gleichung (7):

$$\dot{\vec{r}}_{CRS} = \dot{T} \cdot \vec{r}_{TRS} + T \cdot \dot{\vec{r}}_{TRS} \quad (12)$$

Die Position eines Punktes im terrestrischen System wird für den betrachteten Zeitraum für fest angenommen, es gilt somit $\dot{\vec{r}}_{TRS} = 0$. Da es sich bei der Bewegung und somit der zeitlichen Veränderung des TRS im CRS um eine Rotation handelt, kann diese gleichzeitig auch durch das Kreuzprodukt mit der momentanen Winkelgeschwindigkeit im CRS beschrieben werden:

$$\dot{\vec{r}}_{CRS} = \dot{T} \cdot \vec{r}_{TRS} = \omega \times \vec{r}_{CRS} \quad (13)$$

Setzt man den terrestrischen Ortsvektor $\vec{r}_{TRS} = T^{-1} \cdot \vec{r}_{CRS}$ und ersetzt das Kreuzprodukt mit der Winkelgeschwindigkeit ω durch den Operator $\hat{\omega}$, so erhält man:

$$\dot{\vec{r}}_{CRS} = \dot{T} \cdot T^{-1} \cdot \vec{r}_{CRS} = \hat{\omega} \cdot \vec{r}_{CRS} \quad (14)$$

Die Transformationsmatrix T ist eine Rotationsmatrix und somit orthogonal. Das bedeutet, dass ihre Inverse gleich der Transponierten ist und der Operator $\hat{\omega}$ somit aus dem Produkt der abgeleiteten mit der transponierten Transformationsmatrix gebildet werden kann:

$$T^{-1} = T^T \quad \Rightarrow \quad \hat{\omega} = \dot{T} \cdot T^T \quad (15)$$

Es kann gezeigt werden, dass $\hat{\omega}$ schief-symmetrisch ist und aus Gleichung (13) und (14) folgt:

$$\hat{\omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

mit ω_1 , ω_2 und ω_3 als Komponenten des Winkelgeschwindigkeitsvektors im CRS.

Die Winkelgeschwindigkeit im CRS ist wiederum gleich der mit der Transformationsmatrix multiplizierten terrestrischen Winkelgeschwindigkeit Ω und aus Gleichung (13) folgt:

$$\dot{T} \cdot \vec{r}_{TRS} = \omega \times \vec{r}_{CRS} = T \cdot \Omega \times T \cdot \vec{r}_{TRS} = T \cdot (\Omega \times \vec{r}_{TRS}) \quad (17)$$

Durch Multiplikation mit T^T erhält man schließlich den Operator $\hat{\Omega}$, der die Komponenten des Rotationsvektors im terrestrischen System enthält:

$$T^T \cdot \dot{T} \cdot \vec{r}_{TRS} = \hat{\Omega} \cdot \vec{r}_{TRS} = \Omega \times \vec{r}_{TRS} \quad (18)$$

$$\hat{\Omega} = T^T \cdot \dot{T} = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

Es können somit aus der Multiplikation der gesamten Transformationsmatrix mit ihrer zeitlichen Ableitung die Komponenten des momentanen Erdrotationsvektors im erdfesten Bezugssystem gewonnen werden. Um aus den Ergebnissen eines VLBI Experiments, den fünf Erdrotationsparametern, den wahren Erdrotationsvektor im terrestrischen System zu erhalten, muss zuerst die gesamte Transformationsmatrix zusammengestellt und anschließend ihre zeitliche Ableitung berechnet werden.

Gleichung (20) zeigt schließlich den Zusammenhang des Erdrotationsvektors $\vec{\Omega}$ mit den Komponenten der geophysikalischen Polbewegung m_x und m_y bzw. der Abweichung von der Rotationsrate m_z über die nominelle Rotationsgeschwindigkeit Ω_N . Das negative Vorzeichen in der y-Komponente rührt von der Verwendung des Polkoordinatensystems her, dessen x-Achse in Richtung Greenwich zeigt und die y-Achse nach Westen weist.

$$\vec{\Omega} = \begin{pmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{pmatrix} = \Omega_N \cdot \begin{pmatrix} m_x \\ -m_y \\ 1 + m_z \end{pmatrix} \quad (20)$$

8.3 Berechnung der Transformationsmatrix T

Die Berechnung der kompletten Transformationsmatrix zwischen zälestischem und terrestrischen System geschieht im Einklang mit den IERS Konventionen 2003, wo sie im Kapitel 5 nachgelesen werden kann. Neben den Konventionen [IERS Conventions 2003] waren das Explanatory Supplement des IERS [IERS Explanatory Supplement 2004] sowie Hinweise in Capitaine et al. 2003 hilfreich, letzteres besonders für die korrekte Verwendung der unterschiedlichen Zeitskalen.

Die Transformation setzt sich aus den Teilmatrizen $Q(t)$, $R(t)$ und $W(t)$ zusammen, die, in genannter Reihenfolge, die Bewegung des CIP im CRS, die Rotation um die Achse des CIP und die Bewegung des CIP im TRS beschreiben:

$$[CRS] = T \cdot [TRS] \quad (21)$$

$$T = Q(t) \cdot R(t) \cdot W(t) \quad (22)$$

Die in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen für die Rotationen um eine Koordinaten-

achsen um einen Winkel α lauten:

$$\begin{aligned}
 R_1(\alpha) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \\
 R_2(\alpha) &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \\
 R_3(\alpha) &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Bei der Berechnung der einzelnen Komponenten muss auf den korrekten Zeitpunkt des jeweiligen Systems geachtet werden. Der Zeitpunkt, in dem die Messdaten üblicherweise angegeben sind, ist die Uhrzeit in *UTC*. Dies ist die koordinierte Weltzeit, eine Kombination aus der internationalen Atomzeit (*TAI*) und der auf der Erdrotation basierenden Universalzeit *UT1*. Die Abweichung von *UTC* zu *UT1* (*dUT1*) wird dabei stets unter 0,9 Sekunden gehalten und gegebenenfalls mit einer Schaltsekunde korrigiert. Der Unterschied zur *TAI* wurde als ganzzahliger Sekundenwert definiert und beträgt seit 1. Jänner 2006 33 Sekunden. Die Information über das Einfügen einer Schaltsekunde wird alle 6 Monate im Bulletin C des IERS veröffentlicht, wo auch der Verlauf von *UTC-TAI* seit 1. Jan 1961 nachzulesen ist. [IERS Bulletin C]

$$UT1 = UTC + (UT1 - UTC) = UTC + dUT1 \tag{24}$$

Die *terrestrial time TT*, die den Zeitablauf der Planeten und des Mondes widerspiegelt unterscheidet sich von der *TAI* um exakt 32,184 Sekunden, womit der Zusammenhang zwischen *UTC* und *TT* hergestellt werden kann:

$$TT = UTC + (TAI - UTC) + 32,184 \text{ s} \tag{25}$$

8.3.1 Polmatrix W

Die *Polmatrix* W setzt sich aus den terrestrischen Polkoordinaten des CIP x_p , y_p und der Größe s' zusammen. Die Polkoordinaten werden aus dem verwendeten Datenfile genommen, s' wird mithilfe der momentanen mittleren Amplituden der Chandler- und der jährlichen Polbewegung berechnet:

$$W(t) = R_3(-s') \cdot R_2(x_p) \cdot R_1(y_p) \tag{26}$$

$$s' = -47 \mu\text{as} \cdot t_{[\text{jul.}Jh.]} \quad (27)$$

mit

$$t = (MJD_{TT} - 51544,5)/36525 \quad (28)$$

t ist die Zeit, die seit der Referenzepoche J2000.0 vergangen ist, ausgedrückt in Julianischen Jahrhunderten.

8.3.2 Erddrehungsmatrix R

Die momentane Stellung der Erddrehung ist jene Komponente der gesamten Transformationsmatrix, die sich am Schnellsten verändert. Als Argument wird der *Erddrehungswinkel* Θ verwendet.

$$\Theta(T_u) = 2\pi(0,7790572732640 + f \cdot T_u) \quad (29)$$

mit

$$T_u = MJD_{UT1} - 51544,5 \quad (30)$$

und

$$f = 1,00273781191135448 \quad (31)$$

f gibt das Verhältnis eines mittleren Sonnentages zu einem Sterntag an, es wird das auf der Erde gemessene (Sonnen-) Zeitintervall in ein Sternzeitintervall umgerechnet. Daraus ergibt sich die Drehmatrix um die z-Achse zu:

$$R(t) = R_3(-\Theta) \quad (32)$$

8.3.3 Nutationsmatrix Q

Die Berechnung der Nutationsmatrix erfolgt direkt aus den zälestischen Koordinaten des CIP, X und Y , die mit den gemessenen Nutationskorrekturen dX und dY addiert werden. Die dafür benötigten Werte X , Y und S aus dem Nutationsmodell werden mit der vektoriell in MATLAB programmierten Subroutine `iau2000a.m`, in Einklang mit den IERS Konventionen, berechnet:

$$Q(t) = \begin{pmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{pmatrix} \cdot R_3(S) \quad (33)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X^2 + Y^2) \quad (34)$$

8.4 Berechnung der zeitlichen Ableitung der Transformationsmatrix \dot{T}

Um eine numerisch stabile Berechnung der zeitlichen Ableitung der Transformationsmatrix zu gewährleisten, wurde eine Mischung aus strenger, analytischer Differentiation und der Annäherung durch den Differenzenquotienten gewählt. Für die Berechnung der Ableitung mit dem Differenzenquotienten werden stets Doppeldifferenzen verwendet, d. h. Werte für einen kurzen Zeitpunkt davor bzw. danach durch Interpolation berechnet und gemittelt, wobei das Zeitintervall Δt vom Anwender frei gewählt werden kann. Standardmäßig wird ein Δt von 1 Sekunde verwendet:

$$\dot{f}(t) = \frac{df}{dt} = \frac{f(t + \Delta t) - f(t - \Delta t)}{2 \cdot \Delta t} \quad (35)$$

Bei ausgiebigen Tests und Vergleichen mit der analytischen Differentiation wurde für die Pol- und die Nutationsmatrix die Annäherung durch den Differenzenquotienten als ausreichend erkannt, für den sich schnell ändernden Erddrehungswinkel Θ wird direkt der Erdrotationsparameter $dUT1$ aus den Messdaten für die zeitliche Änderung verwendet:

$$\dot{T} = \dot{Q} \cdot R \cdot W + Q \cdot \dot{R} \cdot W + Q \cdot R \cdot \dot{W} \quad (36)$$

mit

$$\dot{Q} = \frac{Q(t + \Delta t) - Q(t - \Delta t)}{2 \cdot \Delta t} \text{ und } \dot{W} = \frac{W(t + \Delta t) - W(t - \Delta t)}{2 \cdot \Delta t} \quad (37)$$

bzw.

$$\dot{R} = \begin{pmatrix} \sin(-\Theta) \cdot \dot{\Theta} & -\cos(-\Theta) \cdot \dot{\Theta} & 0 \\ \cos(-\Theta) \cdot \dot{\Theta} & \sin(-\Theta) \cdot \dot{\Theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (38)$$

$\dot{\Theta}$ ist die momentane Drehgeschwindigkeit der Erde, zusammengesetzt aus der nominalen Winkelgeschwindigkeit $\Omega_N = 7,2921151467064 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$ und der Ableitung von $dUT1$, umgerechnet in ein Sternzeitintervall. Dabei wird $dUT1$ wiederum mit dem Differenzenquotienten berechnet und von Sekunden in umlaufene Grad und anschließend in Radiant umgerechnet:

$$\dot{\Theta} = \Omega_N + f \cdot \left(\frac{dUT1(t + \Delta t) - dUT1(t - \Delta t)}{2 \cdot \Delta t} \right) \cdot \frac{15 \cdot \pi}{3600 \cdot 180} \quad (39)$$

8.5 Umrechnung in relative Änderung der Sagnacfrequenz

Zur Verwendung und Interpretation der Messreihen des Ringlasers wird die gemessene Frequenzänderung $\Delta f(t)$ in eine relative Änderung zu der Standardfrequenz f_0 umgerechnet und steht mit den Komponenten der Erdrotationsvektors (m_x, m_y, m_z) in folgender

Beziehung:

$$\Delta f_r = \frac{\Delta f(t) - f_0}{f_0} = \cot(\varphi) \cdot [m_x(t) \cdot \cos(\lambda) - m_y(t) \cdot \sin(\lambda)] + m_z \quad (40)$$

λ und φ geben die geographischen Koordinaten in Länge und Breite des Ringlasers an, für Wettzell sind diese

$$\lambda = 12,876^\circ \text{ bzw. } \varphi = 49,145^\circ. \quad (41)$$

8.6 Nutationsmodell IAU 2000A

Seit 1. Jänner 2003 ersetzt das IAU 2000A Modell (Mathews et al. 2002) das zuvor gültige IAU 1976 Präzessionsmodell (Lieske et al. 1977) und die IAU 1980 Nutationstheorie (Wahr 1981, Seidelmann 1982) zur Bestimmung der Position des CIP im zälestischen System [IERS Conventions 2003, Kap. 5]. Es beschreibt die gravitative Wechselwirkung von Sonne und Mond mit dem Erdkörper in Kombination mit dem geophysikalischen Verhalten der Erde, mittels Lösung linearisierter dynamischer Gleichungen. Es basiert auf dem MHB 2000 Modell (Mathews et. al. 2002) für eine nicht starre Erde. Einige der benötigten geophysikalischen Erdparameter wurden dabei durch bestmögliche kleinste Quadrate Schätzungen aus VLBI-Messdaten bestimmt, wodurch die zuvor oft großen Unterschiede zwischen Modell und Beobachtung erheblich minimiert werden konnten.

Die verwendeten dynamischen Gleichungen wurden auch um Effekte aufgrund der Unelastizität des Erdmantels, aufgrund von Ozeangezeiten und aus elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen innerem und äußeren Erdkern sowie zwischen Kern und Mantel erweitert. Des Weiteren werden nach der Linearisierung der frequenzabhängigen Gleichungen noch Zuschläge für nichtlineare Terme und einige weitere Effekte angebracht.

Das resultierende Nutationsmodell enthält 678 lunisolare und 687 planetare Terme und bestimmt die Richtung des CIP im CRS mit einer Genauigkeit von 0,2 mas. Die aus Messungen erhaltenen Korrekturen für das Nutationsmodell (dX , dY) beinhalten dann vor allem nur noch die nicht vorhersagbaren Effekte der *free core Nutation*, definitionsgemäß aber auch Teile der Polbewegung (siehe Kapitel 5.2).

Bei der Bestimmung der Erdorientierung wird das Nutationsmodell in Form der zeitabhängigen Polkoordinaten X , Y und der Größe S , die die Lage des Ephemeridenpols in Bezug zum Äquator des CIP beschreibt, ausgedrückt. Die Berechnung erfolgt durch eine Reihenentwicklung über die Zeit, unter Verwendung der lunisolaren und planetaren Delaunayargumente. Die Parameterwerte für die Reihenentwicklung sind auf der IERS Website in Tabellenform veröffentlicht²⁴.

[Mathews et al., 2002] [IERS Conventions 2003, Kap. 5]

²⁴(<http://maia.usno.navy.mil/conv2000/chapter5> , Tables 5.2a-c)

8.7 Modell der Oppolzerterme

Die tägliche retrograde Polbewegung ist eine Auswirkung von lunisolaren Attraktionskräften und ist bereits im Nutationsmodell enthalten. Deshalb muss sie zur Berechnung des Erdrotationsvektors eigentlich nicht extra berücksichtigt werden. Für Vergleichszwecke wurde das Modell für die Bewegung der Rotationsachse jedoch im Berechnungsprogramm implementiert.

Zur Berechnung der Oppolzerterme wird das Modell von Brzeziński (1985) für eine elastische Erde mit flüssigem Kern verwendet. Es handelt sich dabei um eine Erweiterung der Oppolzerterme nach McClure (1973) um Effekte eines flüssigen Erdkerns auf die Nutation und die Erdgezeiten (Wahr 1981). Das Modell enthält 170 Terme im täglichen Frequenzband im erdfesten System und bezieht sich auf das Nutationsmodell IAU 1980 (siehe auch Kap. 8.6). Die Frequenzen und Phasen decken sich mit den zälestischen Perioden der Präzession und der langperiodischen Nutation und sind somit präzise bestimmbar. Lediglich die Amplituden sind vom Aufbau und Verhalten des Erdkörpers abhängig und weniger gut vorhersagbar. Ein Bild der typischen Bewegung und ein Frequenzspektrum sind in Kapitel 3.2.5, Abbildung 5 zu sehen.

[Brzeziński, 1986] [Frede und Dehant, 1999]

Im Programm wird die von Brzeziński (1985) in Fortran geschriebene Routine ROTRID verwendet, die von Mendes Cerveira in eine vektorielle MATLAB Routine übertragen wurde. Es werden dabei die lunisolar verursachten täglichen Effekte auf die Erdrotationsachse für das Modell einer elastischen Erde mit flüssigem Erdkern berechnet, ausgedrückt in den Komponenten des Erdrotationsvektors m_x und m_y .

8.8 Modell der ozeanischen Gezeiten

Verwendet man als Inputdaten Erdorientierungsparameter vom IERS, so handelt es sich dabei um Datensätze an gleichmäßigen Zeitintervallen, ohne die Einflüsse von täglichen und halbtäglichen Variationen. Um eine höhere Auflösung der meist täglichen Werte zu erhalten, kann zwischen den veröffentlichten Daten interpoliert werden, wobei für hohe Genauigkeitsanforderungen die zuvor eliminierten täglichen und halbtäglichen Variationen wieder miteinbezogen werden müssen.

Ein Großteil dieser täglichen bzw. subtäglichen Variationen der Polbewegung wird durch die ozeanischen Gezeiten verursacht. Im Modell von Eanes (2000), bei dem es sich um das von 8 zu 71 Gezeitentermen erweiterte Ray Modell (Ray et. al. 1994) handelt, werden mit den Delaunay'schen Variablen die Variationen in x_p , y_p und $dUT1$ berechnet. Die durch Meeresgezeiten verursachte Polbewegung hat Amplituden von einigen Zehntel Millibogensekunden, die dadurch verursachte Änderung von LOD bewegt sich im Bereich von einigen Hundertstel Millisekunden [Haas und Wunsch, 2006]. Wie in Abbildung 18

zu erkennen ist, liegen die Hauptperioden um -12 , $+12$, $+24$ und $+26$ Stunden für die Polbewegung bzw. bei 12 , 24 und 26 Stunden für LOD.

Im Berechnungsprogramm wird eine von R. Haas anhand der IERS Konventionen 2000, Kapitel 8, Tabellen 8.2 und 8.3 in MATLAB programmierte Routine verwendet. Die damit berechneten Variationen werden noch vor der Berechnung des Erdrotationsvektors direkt an die Eingangsdaten angebracht.

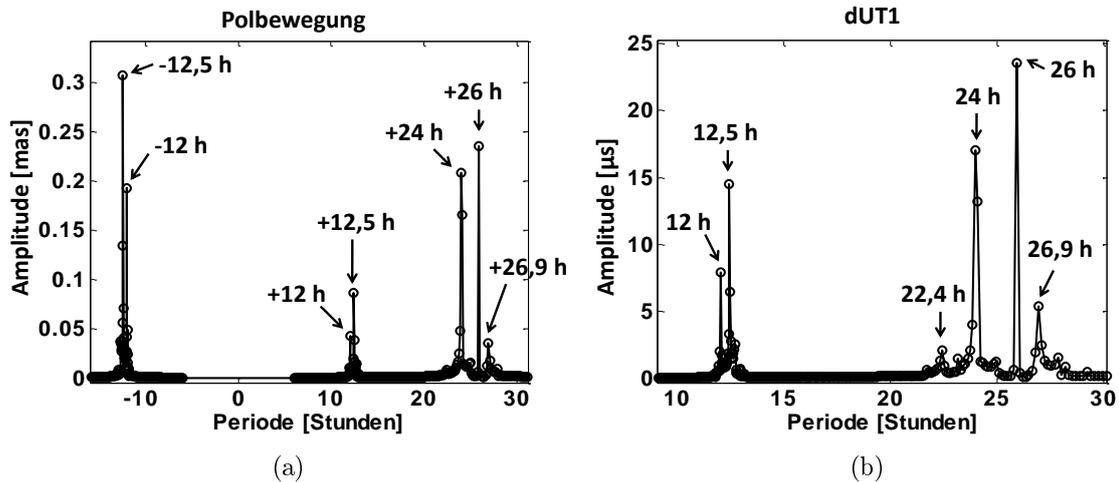


Abbildung 18: Perioden des Effektes der ozeanischen Gezeiten auf die Polbewegung (a) und dUT1 (b)

8.9 Lunisolare gravitative Gezeiten

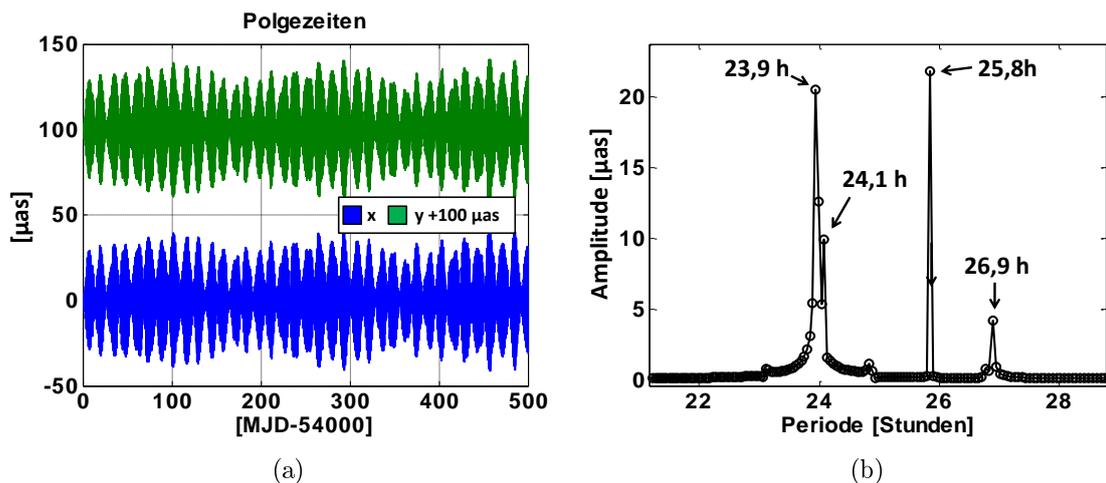


Abbildung 19: Polgezeiten im Zeitbereich (a) und Frequenzbereich (b)

Eine weitere Ursache für Variationen des Pols mit täglicher Periode ist ein lunisolärer Effekt in Verbindung mit dem Schwerepotential der Erde. Dabei handelt es sich wiederum

um einen periodischen Einfluss, mit Amplituden von einigen Hundertstel Millibogensekunden für x_p und y_p . Von der in den IERS Konventionen 2003 gegebenen Tabelle 5.1 wird nur der untere Teil mit Perioden von etwa 1 Tag verwendet, die verwendete MATLAB Routine wurde von Mendes Cerveira aus einem Fortran-Programm von Bizouard erstellt. Auch dieses Modell bezieht sich auf den CIP und wird vor der Berechnung des Erdrotationsvektors zu den Komponenten der Polbewegung addiert. Abbildung 19 zeigt eine Zeitreihe der Korrektur für x_p und y_p (a) und ein Amplitudenspektrum (b). Die Hauptperioden liegen bei ungefähr 24, 26 und 27 Stunden.

Teil III

Ergebnisse

9 Vergleich des Präzessions-/Nutationsmodells mit dem Modell der Oppolzerterme

Wie weiter oben bereits erwähnt wurde, wird die tägliche retrograde Polbewegung bei der üblichen Modellierung zur Nutation gezählt und muss daher im Nutationsmodell enthalten sein. Dies soll in diesem Kapitel überprüft werden, indem die Komponenten der Nutation mithilfe des erstellten Programms in Bewegungen des Erdrotationsvektors im terrestrischen System umgerechnet werden und mit dem Modell der Oppolzerterme verglichen werden. Für Abbildung 20 wurde für einen Zeitraum von 500 Tagen das Nutationsmodell berechnet und anschließend in Komponenten des Erdrotationsvektors umgerechnet. Abbildung 20 (a) zeigt die X-Komponente der Nutation wie sie mit dem Unterprogramm `iers2000a.m` berechnet werden kann, in (b) ist die dazugehörige Polbewegung dargestellt. Dabei sind die beiden bestimmenden Perioden von 1 Tag und 14 Tagen gut zu erkennen.

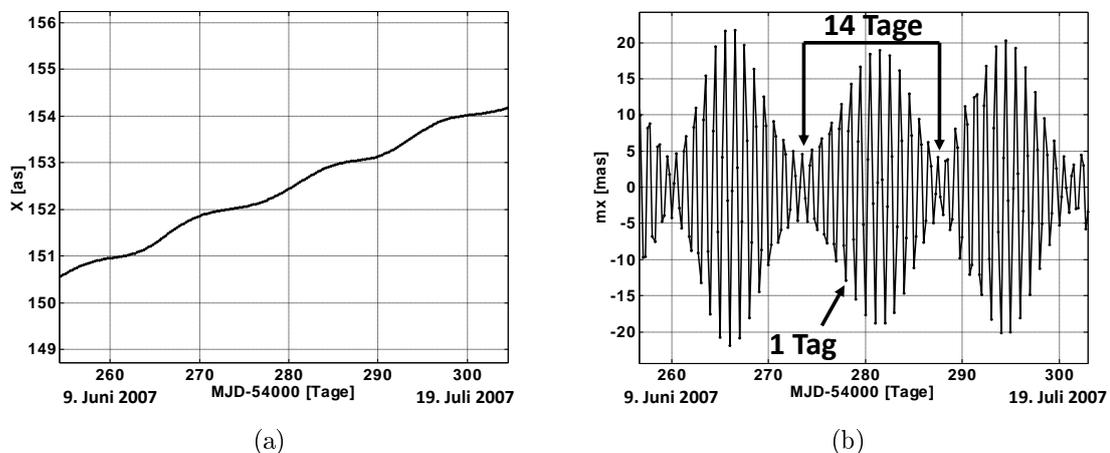


Abbildung 20: Nutationskomponente X aus IAU 2000A (a), in m_x umgerechnet (b)

Vergleicht man nun die aus dem Nutationsmodell berechneten terrestrischen Polbewegungskomponenten m_x und m_y mit dem Modell der Oppolzerterme, sind Differenzen von bis zu $\pm 50 \mu\text{s}$ festzustellen. Abbildung 21 zeigt die Abweichungen des Modells für die Oppolzerterme von der aus dem Nutationsmodell IAU 2000A berechneten geophysikalischen Polkomponente in y für einen Zeitraum von 500 Tagen.

Die signifikanten Abweichungen der Amplituden rühren wahrscheinlich von den unterschiedlichen Nutationstheorien her. Während im Berechnungsprogramm das heute gültige

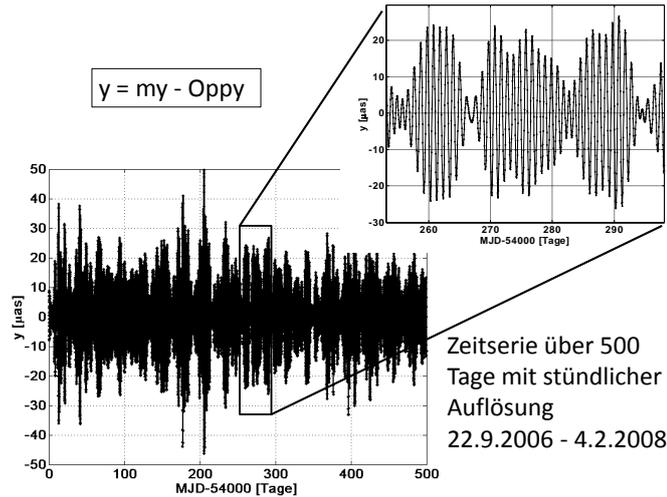


Abbildung 21: Vergleich des Nutationsmodells mit dem Modell der Oppolzerterme

IAU 2000A Präzessions-/Nutationsmodell verwendet wird, bezieht sich die Berechnung der Oppolzerterme auf das zuvor verwendete IAU 1980 Modell (vgl. auch Kap. 8.7). Eine Tabelle über die Korrekturen der 6 wichtigsten Perioden kann in Brzeziński [2004] gefunden werden, der dort angegebene Gesamteffekt durch Summenbildung dieser Perioden beträgt $23,2 \mu\text{as}$. In dem hier untersuchten Zeitraum liegt der mittlere Fehler (quadratischer Mittelwert) mit $12 \mu\text{as}$ meistens darunter, manchmal wird er jedoch auch deutlich überschritten.

10 Einfluss der ozeanischen Gezeiten

Das verwendete Modell für die Auswirkung der ozeanischen Gezeiten auf die Polbewegung wurde für die geodätische Polbewegung, also die Bewegung bezüglich des CIP entwickelt und liefert Korrekturen in x_p , y_p und $dUT1$ (siehe Kap. 8.8). Da die Polkoordinaten des CIP nicht gleich jenen des IRP sind, müssen sich auch die Werte der Korrekturen für die ozeanischen Gezeiten für m_x und m_y ändern.

Brzeziński beschreibt in seinem Vortrag beim FGS Workshop 2004 [Brzeziński, 2004] die Größenordnungen der nötigen Änderungen der Korrekturen für die Komponenten der Polbewegung. Basierend auf Gleichung (11) formuliert er im Frequenzbereich den Zusammenhang zwischen der geophysikalischen (m) und der geodätischen (p) Polbewegung in Abhängigkeit der Frequenz (σ).

$$m(\sigma) = p(\sigma) \cdot \left(1 + \frac{\sigma}{\Omega}\right) \quad (42)$$

Mithilfe des Programms kann diese theoretische Aussage nun auch praktisch überprüft

und verifiziert werden. Um die Auswirkung der ozeanischen Gezeiten experimentell bestimmen zu können, wurde über einen Zeitraum von 300 Tagen einerseits der momentane Erdrotationsvektor lediglich aus dem Nutationsmodell (keine Werte für die Polbewegung und Nutationszuschläge) berechnet, andererseits aus dem Nutationsmodell plus den von Eanes bestimmten Zuschlägen für die ozeanischen Gezeiten als Polbewegung. Die Differenz der berechneten Erdrotationsvektoren entspricht somit der durch ozeanische Gezeiten verursachten Bewegung des ERV im terrestrischen System. In Abbildung 22 sind die Zeitreihen der ozeanischen Gezeiten der geodätischen Polbewegung (a-c) jenen der geophysikalischen (d-f) gegenübergestellt. Dabei fällt auf, dass die Amplituden für den ERV um einiges größer sind als jene für den CIP. Die betrachteten Zeitreihen für die zwei

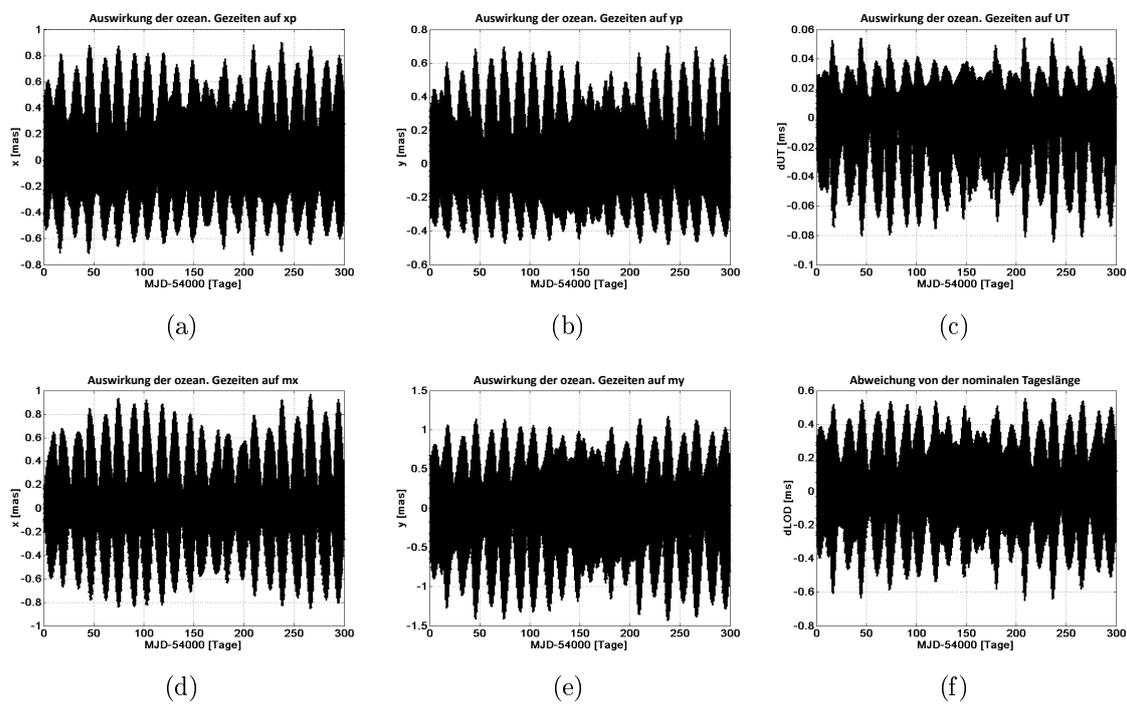


Abbildung 22: Einfluss der ozeanischen Gezeiten auf die geodätische Polbewegung für (a) x_p , (b) y_p und (c) dUT bzw. auf die Komponenten des Erdrotationsvektors in (d) m_x , (e) m_y und (f) $dLOD$ von 22. Sept. 2006 bis 19. Juli. 2007 mit stündlicher Auflösung.

unterschiedlichen Polbewegungen unterscheiden sich im Mittel (quadratischer Mittelwert) um 0,3 mas in x bzw. 0,5 mas in y, im Extremfall weichen sie allerdings bis zu 1 mas in x bzw. 1,4 mas in y voneinander ab. In Abbildung 23 sind die Amplitudenspektren für die Variation der Polkoordinaten (a, c) sowie von $dUT1$ (b) bzw. $dLOD$ (d) dargestellt. (a) und (b) beziehen sich auf die Bewegung des CIP, (c) und (d) auf jene des IRP. Zur Berechnung der Spektren wurden obige Zeitreihen verwendet.

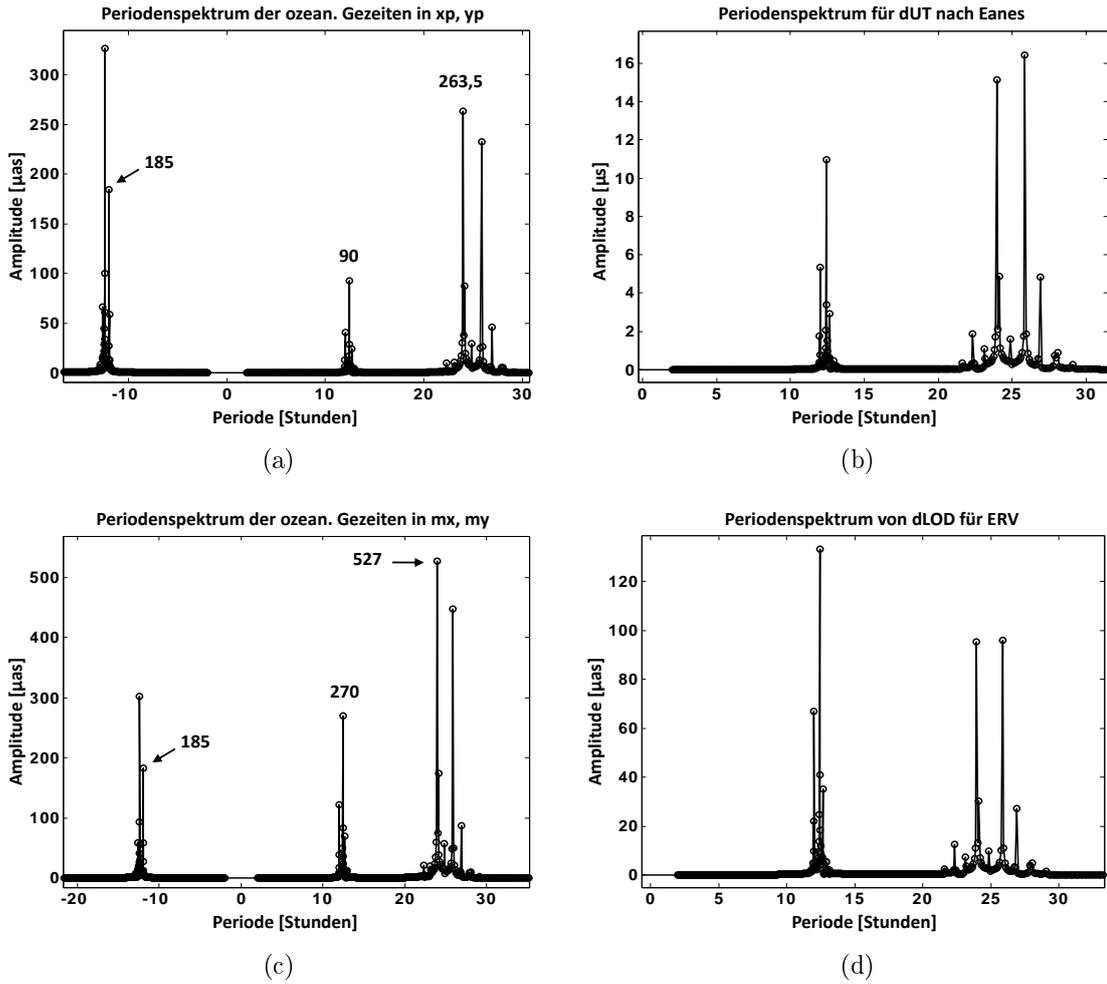


Abbildung 23: Amplitudenspektren des Einflusses der ozeanischen Gezeiten auf die Bewegung des CIP (a) bzw. IRP (c) unterteilt in prograde und retrograde Perioden, sowie der Auswirkung auf dUT1 für den CIP (b) bzw. auf die Tageslänge für den IRP (d).

Die dadurch bestimmten Amplituden im ERV-Spektrum stimmen mit den aus Gleichung (42) berechneten theoretischen Werten gut überein.

z. B.:

tägliche Periode $f = 24 h$, $\sigma = 1$: $m \approx 2 \cdot p$ d. h. $527 = 2 \cdot 263,5$

halbtägige Periode $f = 12 h$, $\sigma = 2$: $m \approx 3 \cdot p$ d. h. $270 = 3 \cdot 90$

halbtägige, retrograde Periode $f = -12 h$, $\sigma = -2$: $m \approx -p$

d. h. $-185 = -1 \cdot 185$

11 Der ERV aus VLBI-Messungen

11.1 Daten

Bei den verwendeten VLBI Daten handelt es sich um Ergebnisse aus den beiden Messkampagnen CONT02 und CONT05. Während der CONT-Experimente wird mit einem Netz aus auf der ganzen Welt verteilten VLBI Antennen über einen Zeitraum von 14 Tagen ununterbrochen beobachtet. Sie sind somit die längsten vorhandenen kontinuierlichen VLBI Messungen. Für die hier verwendeten Daten wurden stündliche Polkoordinaten (x_p , y_p) und momentane Rotationsgeschwindigkeiten ($dUT1$) bestimmt, welche mit täglichen Werten für die Nutationszuschläge (dX , dY) die benötigten EOPs bilden. Die Auswertung der Daten wurde am Onsala Observatorium von R. Haas mit der Software CALC/SOLVE durchgeführt.

11.2 CONT02

Die CONT02 Messungen fanden im Zeitraum von 16. Oktober 2002 18:00 UT bis 31. Oktober 2002 17:45 UT statt. Abbildung 24 zeigt das Ergebnis der Berechnung mit dem Programm ERV. Die blaue Linie stellt die Bewegung des Rotationspols in m_x und m_y dar, die große tägliche, retrograde Bewegung ist dabei deutlich zu erkennen. Nach Abzug der für diesen Zeitraum modellhaften Oppolzerterme bleibt die schwarze Linie übrig, im Vergleich dazu ist in Rot die gemessene Polbewegung x_p und y_p dargestellt. Dabei wurde für y_p ein Vorzeichenwechsel durchgeführt, da m_y üblicherweise nach Osten orientiert ist, die y-Achse des Polkoordinatensystems allerdings nach Westen zeigt.

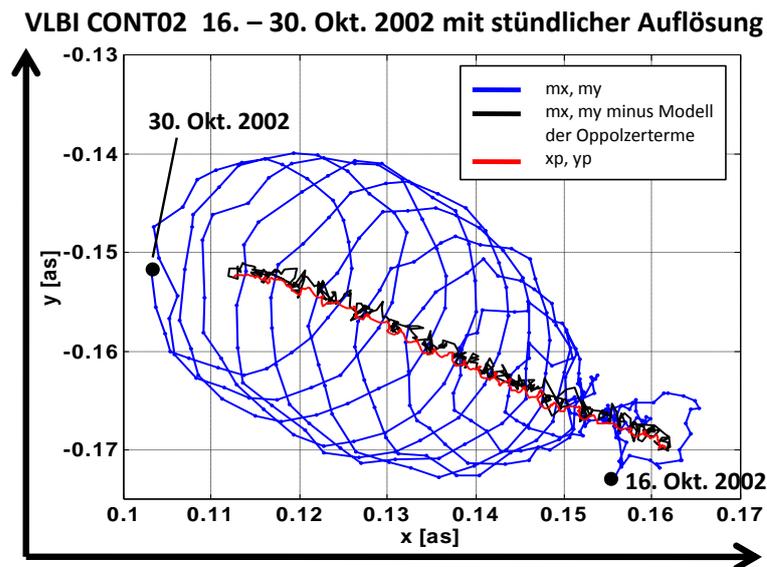


Abbildung 24: CONT02

In Abbildung 25 sind die Komponenten der Polbewegung dem Modell des Einflusses der ozeanischen Gezeiten und der Polgezeiten in Bezug zum CIP gegenübergestellt. Dafür wurden die Messwerte von einem Trend befreit, der durch Mittelung über 48 Stunden berechnet wurde. In (a) für x_p und (b) für y_p sieht man deutlich die durch die Gezeiten hervorgerufene Variation. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden die Messwerte von diesem Einfluss befreit. Nach Abzug der Oppolzerterme, des Trends, sowie der

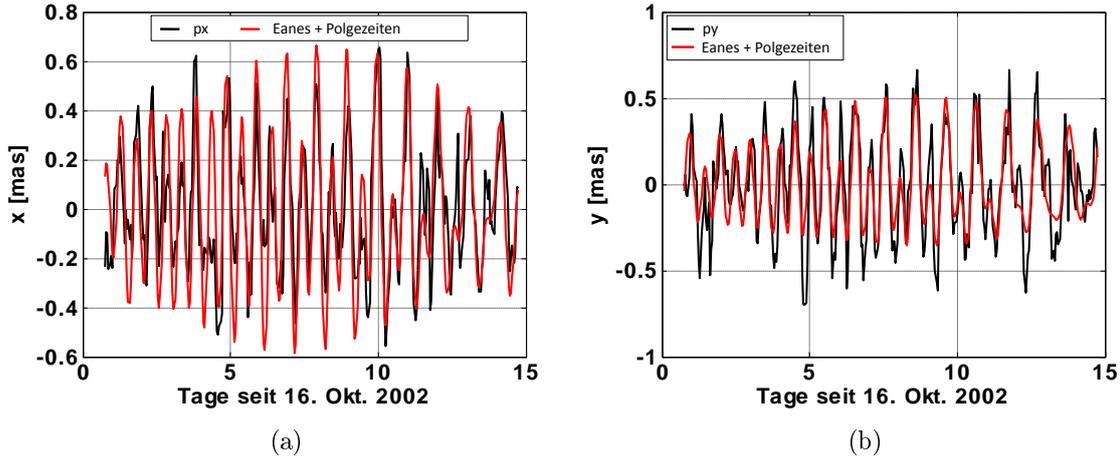


Abbildung 25: Vergleich x_p , y_p mit den modellhaften Einflüssen der ozeanischen Gezeiten nach Eanes und der Polgezeiten

ozeanischen und der Polgezeiten bleibt ein um die größten bekannten Effekte reduziertes Messsignal, das in Abbildung 26 dargestellt ist. Zum Vergleich ist in Rot das Signal in Bezug zum CIP, also die Messwerte x_p und y_p gezeichnet. Die durch Gleichung (42) gegebene Verstärkung der Amplituden ist hier deutlich erkennbar und kann erneut überprüft werden.

$$f = 12 h, \sigma = 2 : m \approx 3 \cdot p$$

$$f = -8 h, \sigma = -3 : m \approx -2 \cdot p$$

$$f = -12 h, \sigma = -2 : m \approx -p$$

Das große Restsignal von $400 \mu\text{as}$ bei 12 h überrascht etwas, steckt aber in den Messdaten. Grund dafür könnten eventuelle Fehler im Gezeitenmodell sein, dies bedarf allerdings noch genaueren Untersuchungen. Wie deutlich erkennbar und anhand des mathematischen Zusammenhangs auch leicht überprüfbar ist, kommt es im hochfrequenten Bereich zu einer äußerst starken Amplitudenverstärkung. Dies ist einerseits ein Vorteil, sodass eventuell vorhandene hochfrequente Signale leichter entdeckt werden können, andererseits wird auch das in den Messdaten enthaltene Rauschen verstärkt, was bei der Interpretation berücksichtigt werden muss.

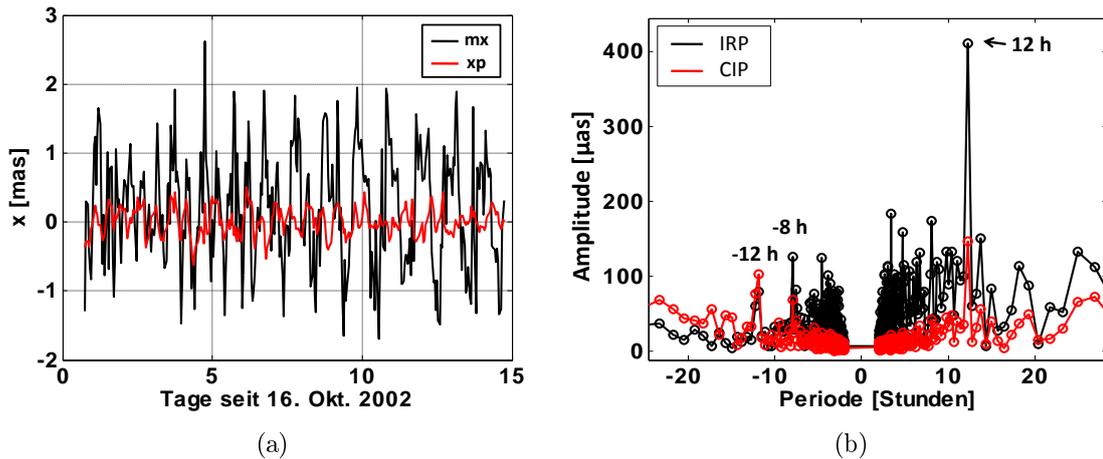


Abbildung 26: Messsignal nach Abzug der Oppolzerterme, eines Trends und der ozeanischen und Polzeiten. Vergleich von x_p und m_x im Zeitbereich (a) und im Frequenzbereich (b).

11.3 CONT05

Der nächste Datensatz der untersucht wurde, sind die Messungen der CONT05 Kampagne, die von 12. September 2005 17:00 UT bis 27. September 2005 17:00 UT stattfand. Abbildung 27 zeigt wiederum das Ergebnis aus dem Programm (blau) im Vergleich mit den um die Oppolzerterme reduzierten Werten (schwarz) und den Eingangswerten (rot). Das Restsignal, nach Abzug der Oppolzerterme, eines Trends, sowie des Einflusses durch

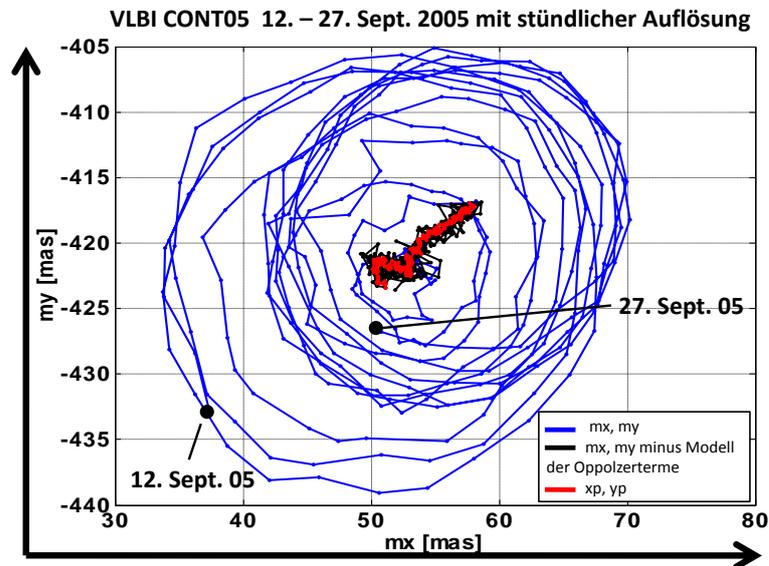


Abbildung 27: CONT05

die Gezeiten, ist in Abbildung 28 zu sehen. Der Unterschied zwischen der Bewegung des

CIP (rot) und jener des IRP (schwarz) ist wiederum eindeutig, allerdings haben diese ein wenig andere Perioden als bei der Analyse der CONT02 Daten. Besonders das große Signal im täglichen retrograden Frequenzband des CIP ist überraschend.

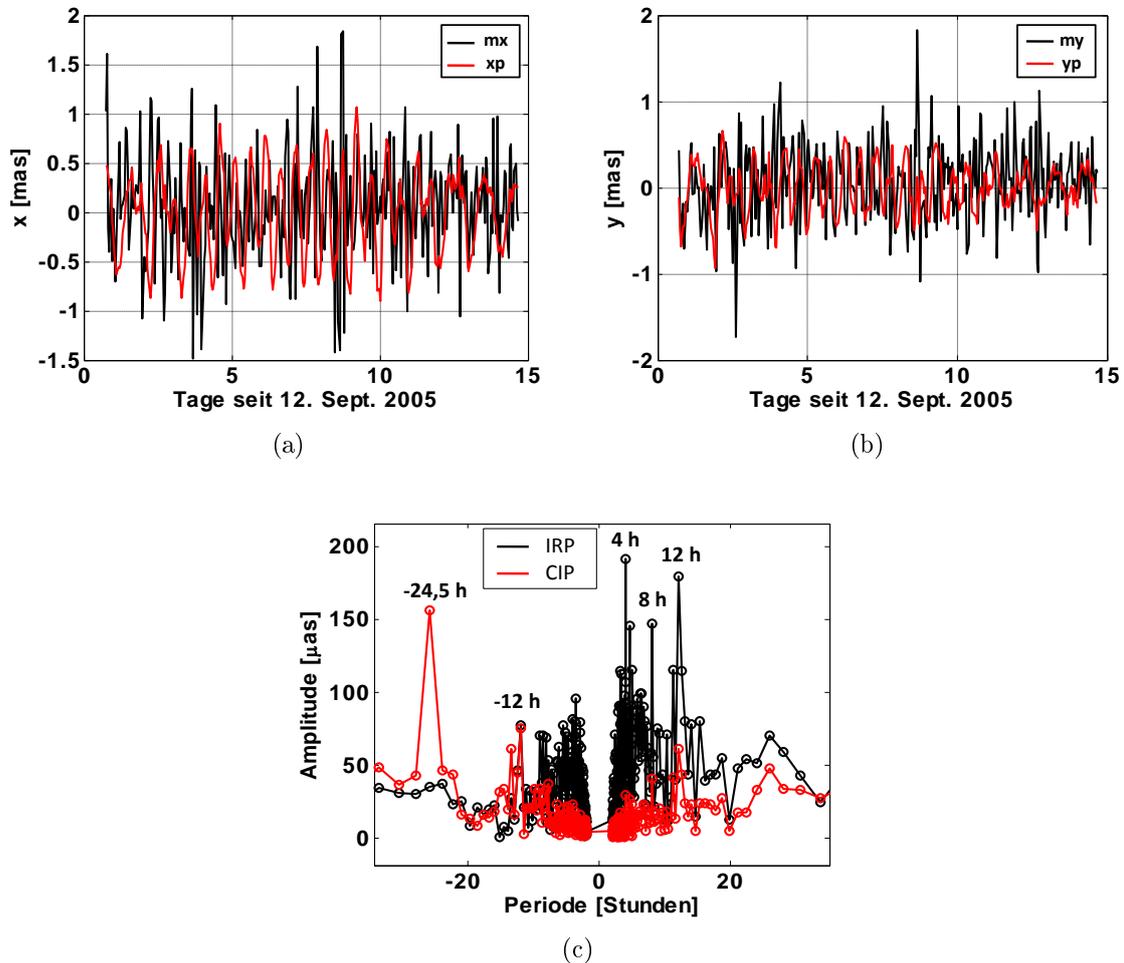


Abbildung 28: Messsignal nach Abzug der Oppolzerterme, eines Trends und der ozeanischen und Polzeiten. Vergleich von x_p und m_x (a), y_p und m_y (b) im Zeitbereich und im Amplitudenspektrum (c).

11.4 Tägliche Messwerte gegenüber stündlichen Messwerten

Ziel dieses Abschnitts ist es, die Auswirkung bzw. die Verbesserung bei Verwendung von stündlichen Messwerten gegenüber den täglichen Messreihen zu zeigen. In Abbildung 29 und 30 sind die Ergebnisse von CONT02 bzw. CONT05 jenen aus den täglichen Werten des IERS gegenübergestellt. Aus den gegebenen Erdorientierungsparametern wurden mit dem Berechnungsprogramm die Werte des momentanen Erdrotationsvektors berechnet und dann im Zeit- und Frequenzbereich verglichen.

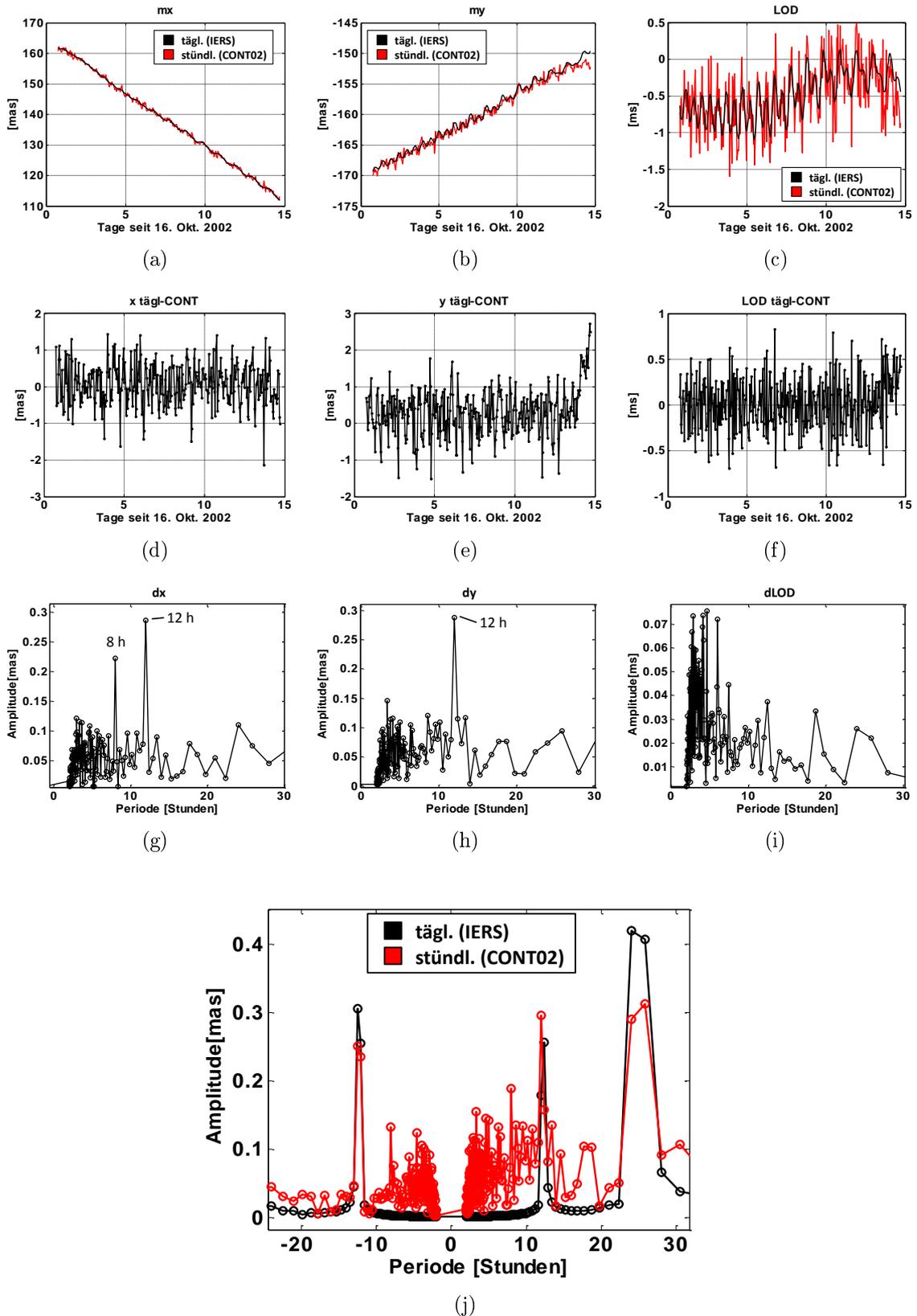


Abbildung 29: Gegenüberstellung von täglichen (IERS) und stündlichen (CONT02) Messwerten. Darstellung der x-Komponente (a), der y-Komponente (b) und von dLOD (c). Die Differenz von x (d), y (e) und dLOD (f) im Zeitbereich, sowie die dazugehörigen Amplitudenspektren in x (g), y (h) und dLOD (i). Vergleich der Spektren für die Polbewegung (j).

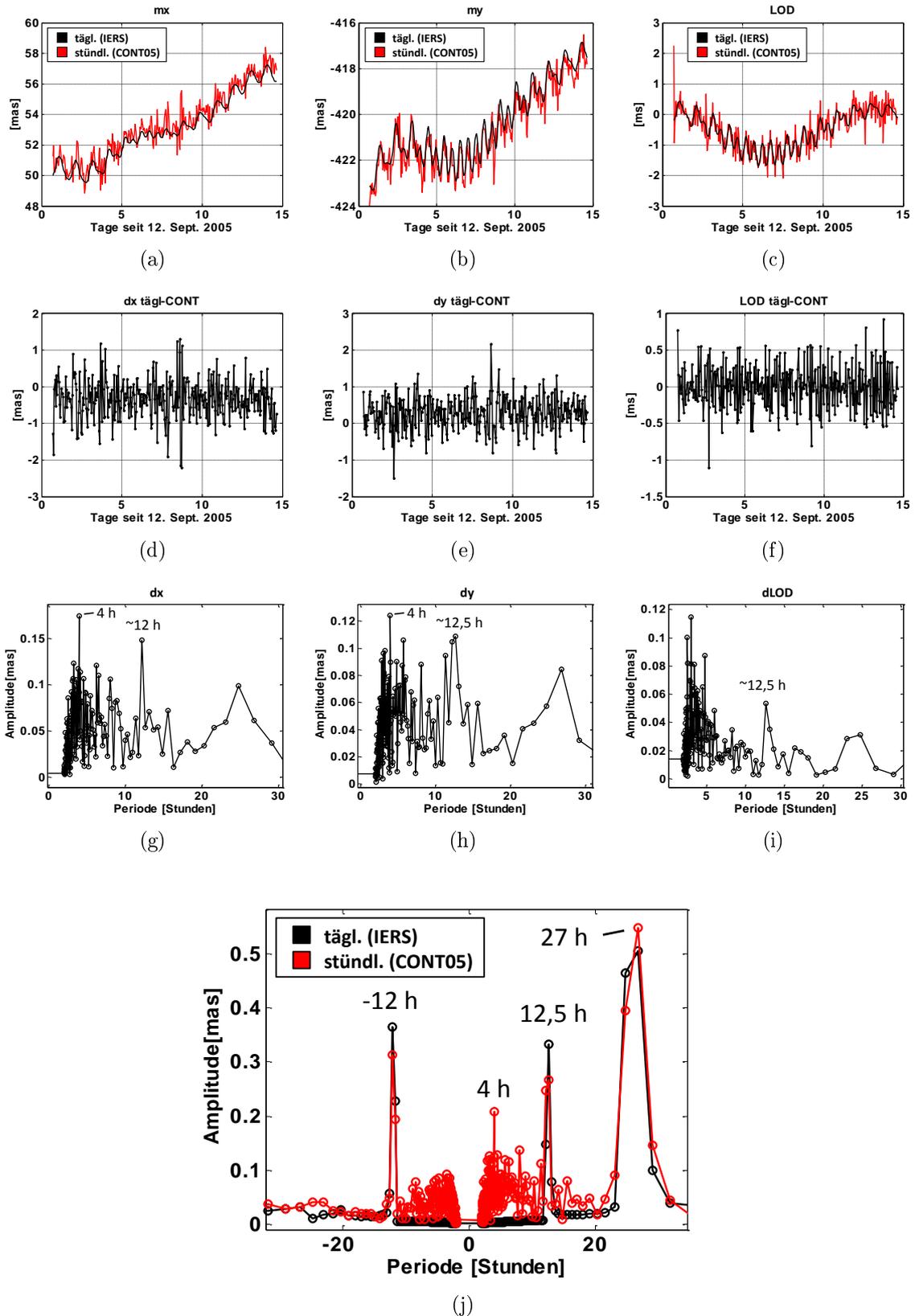


Abbildung 30: Gegenüberstellung von täglichen (IERS) und stündlichen (CONT05) Messwerten. Darstellung der x -Komponente (a), der y -Komponente (b) und von $dLOD$ (c). Die Differenz von x (d), y (e) und $dLOD$ (f) im Zeitbereich, sowie die dazugehörigen Amplitudenspektren in x (g), y (h) und $dLOD$ (i). Vergleich der Spektren für die Polbewegung (j).

In den Bildern (a-c) sind jeweils beide Zeitreihen dargestellt, in Schwarz das Ergebnis aus den täglichen Werten, in Rot jenes der stündlichen CONT-Werte. In den Teilabbildungen (d-f) sind die Differenzen, täglich minus stündlich, ebenfalls im Zeitbereich zu sehen, (g-i) zeigen die dazugehörigen Amplitudenspektren. In (j) sind schließlich die Amplituden der Polbewegung im Spektralbereich gegenübergestellt.

Wie zu erwarten war, liefern die stündlichen Messreihen schon eine gute Analysemöglichkeit im subtäglichen Bereich. Besonders bei 8, 6 und 4 Stunden gibt es Signale, nach deren Ursachen jetzt geforscht werden kann. Besonders signifikant ist jedoch der Unterschied im halbtägigen Bereich (+12 h), der etwas verwundert, sollten doch diese Signale mit den bekannten Modellen eigentlich schon besser erfasst sein. Des Weiteren gibt es einige Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus CONT02 und jenen aus CONT05, welche möglicherweise auf den kurzen Zeitraum von 14 Tagen zurückzuführen sind. Dennoch lässt dies auch die Schlussfolgerung zu, dass auch die VLBI Zeitreihen, mit ihrer komplizierten Auswertung eventuell noch Fehler enthalten. Interessant dafür wird der Vergleich mit den Daten der CONT08 Serie, die von 12. bis 26. August 2008 stattfindet.

12 Das Erdrotationssignal aus Ringlaserdaten

In Kapitel 8.5 wurde bereits erwähnt, dass die ursprüngliche Messgröße des Ringlasers, die Änderung der Sagnacfrequenz Δf , zur weiteren Verwendung meist in die Änderung der relativen Sagnacfrequenz Δf_r umgerechnet wird (vgl. Formel 40). Die nominelle Sagnacfrequenz f_0 des Großringlasers „G“ beträgt 348,6 Hz. Bevor die dadurch erhaltene Zeitreihe des Ringlasers über die Sagnac-Formel (10) mit dem Erdrotationsvektor in Verbindung gebracht werden kann, müssen noch einige lokale und globale Korrekturen angebracht werden.

Die Berücksichtigung aller notwendigen Korrekturen, sowie der Vergleich mit den zuvor im Programm *ERV* berechneten Erdrotationsdaten, wird mit der von Mendes Cerveira erstellten MATLAB Routine `process_rlg6.m` durchgeführt. Im ersten Teil dieses Kapitels wird die Strategie der notwendigen Korrekturen, sowie der verwendeten Glättungsmechanismen erläutert, ehe dann im zweiten Teil auf den Vergleich der Zeitreihen unterschiedlicher Herkunft auf Basis der, den Variationen des Erdrotationsvektors entsprechenden Änderungen der relativen Sagnacfrequenz eingegangen wird. Eine Beschreibung des mathematischen und theoretischen Hintergrunds ist in Mendes Cerveira [2008 und noch nicht veröffentlicht] zu finden.

12.1 Aufbereitung der RL-Daten

Bei einem ersten Blick auf die bisher beste Zeitreihe des Großringlasers „G“ in Wettzell, im Zeitraum vom 22. September 2006 bis 13. Februar 2007 mit einem Sampling von 30 Minuten, ist sie mit jener, aus der Erdrotation berechneten Kurve nur schwer zu vergleichen (Abbildung 31). Die Aufzeichnungen des Ringlasers sind durch eine Drift, zahlreiche Sprünge sowie einige Ausreißer geprägt, die auch durch Hinzunahme der Tiltmeterdaten nicht eliminiert werden können.

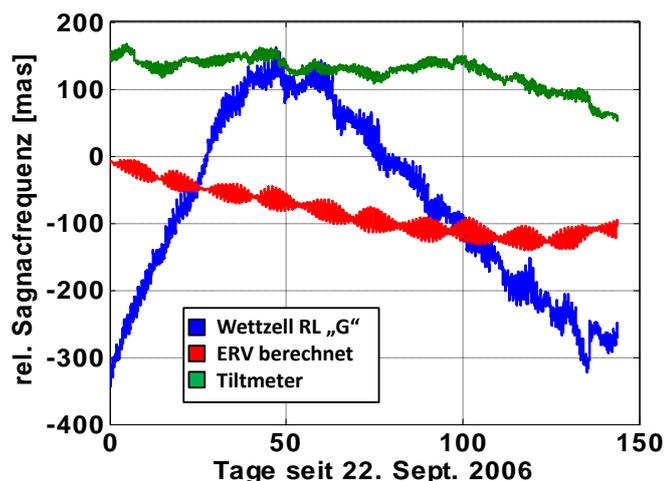


Abbildung 31: Vergleich der Zeitreihe des Ringlasers (blau) mit der berechneten Erdrotation (rot) und den Aufzeichnungen der Tiltmeter (grün).

Um diesen Vergleich wie angestrebt im kurzzeitigen Bereich dennoch durchführen zu können, wird die Zeitreihe des Ringlasers durch Abziehen eines Trends, durch zeitliche Mittelung sowie durch mathematische Operationen zur Elimination von Ausreißern korrigiert.

12.1.1 Lokale Effekte

Um die lokalen Effekte von den globalen aus den Daten des Ringlasers herausfiltern zu können, ist auf dem Messgerät ein Netz von Neigungsmessern angebracht. Zur Umrechnung der Messungen der Neigungsmesser in eine erdrotationsrelevante Orientierungsänderung wird die mittlere Neigung in Nord-Süd Richtung abgeleitet. Wegen der unterschiedlichen Messprinzipien muss das Ergebnis der Neigungsmesser allerdings noch um die zeitliche Variation des Horizontalanteils des Schwerevektors korrigiert werden. Dafür wird einerseits die mit geeigneten Modellen berechnete Gezeitenattraktion verwendet und andererseits mithilfe von Wettermodellen versucht, die Attraktionswirkung aus atmosphärischen Dichtevariationen zu berechnen. Das größte von den Tiltmetern aufgezeichnete und auf den

Ringlaser wirkende Signal kommt von den festen Erdgezeiten (*solid earth tides*). Aufgrund der Anziehungskraft von Sonne, Mond und den Planeten kommt es zu Verschiebungen von Punkten an der Erdoberfläche, deren Größe mit dem geeigneten Modell zu den bekannten, aus den Ephemeriden berechneten, Frequenzen bestimmt werden kann. Den IERS Konventionen [IERS Conventions 2003, Kapitel 7] folgend wurde die Berechnung nach Mathews et al. (1995) durchgeführt. Die ebenfalls in den Konventionen genannten Ursachen der Verschiebung eines Punktes auf der Erdoberfläche aufgrund von Meeresauflasten (*ocean loading*), aufgrund der Polbewegung (*pole tide*) und durch atmosphärische Auflasten (*atmospheric loading*) wurden für den betrachteten Zeitraum Sept. 2006 bis Feb. 2007 berechnet, aufgrund ihres geringen Einflusses im Folgenden aber nicht weiter berücksichtigt (Abbildung 32 (a)). Aus der aus den Modellen berechneten geozentrischen

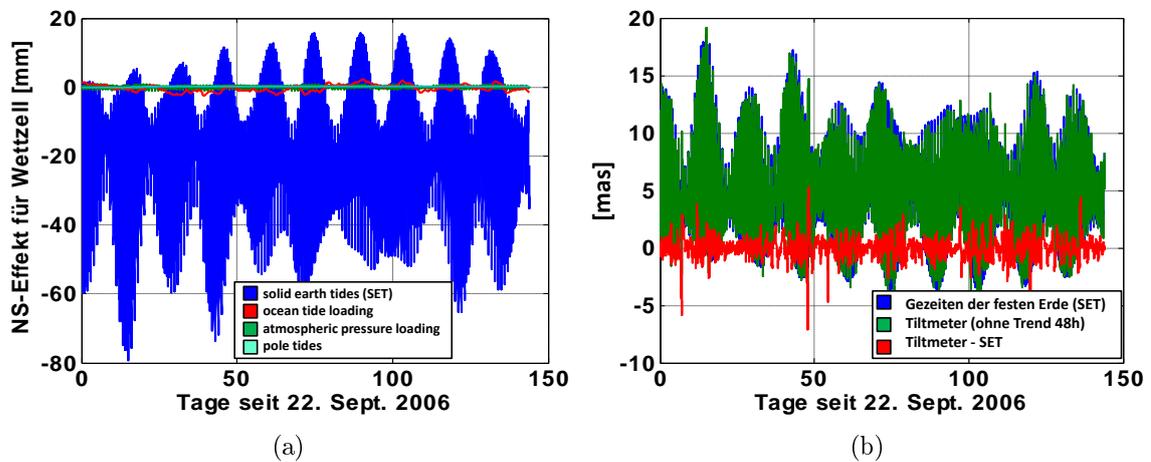


Abbildung 32: Einfluss der unterschiedlichen Effekte auf die Positionsänderung in Nord-Süd Richtung für Wettzell

Abweichung der Stationsbreite $\Delta\phi$ erhält man durch Multiplikation mit dem Kotangens der Stationsbreite und einem Faktor, der sich aus den *Love-* und *Shida-* Zahlen zusammensetzt, jene durch die Erdgezeiten verursachte Deformationen, auf die der Ringlaser sensitiv ist [Mendes Cerqueira et al., noch nicht veröffentlicht].

$$\Delta S_{SET} = -7,1759 \cdot \cot(\phi_{Wettzell}) \cdot \Delta\phi \quad (43)$$

Ein Vergleich des Einflusses der festen Erdgezeiten mit dem Signal der Neigungsmesser zeigt, dass neben einigen Ausreißern bis zu 5 mas nur kleine Unterschiede bestehen (Abbildung 32 (b)). Dies bestätigt die Annahme, dass der Hauptanteil der lokalen Neigungsänderungen durch die Gezeiten der festen Erde verursacht werden. Für die Korrektur des Ringlasersignals aufgrund von lokalen Deformationen ist im untersuchten Fall der mittels dem passenden Modell berechnete Einfluss der festen Erdgezeiten ausreichend und

die Tiltmeterdaten samt ihrer komplizierten Schwerekorrektur werden nicht verwendet.

12.1.2 Elimination von Trend und Datensprüngen

In einem ersten Schritt soll ein vermutetes Messrauschen des Ringlasers verringert werden. Dazu wird die Zeitreihe mit einem so genannten *smoothing* über 7 Datenpunkte geglättet. Bei einer vorhandenen Datenrate von 30 Minuten, entspricht dies einer Mittelung über 3,5 Stunden (Abbildung 33 (a)). Wie schon in vorherigen Kapiteln dieser

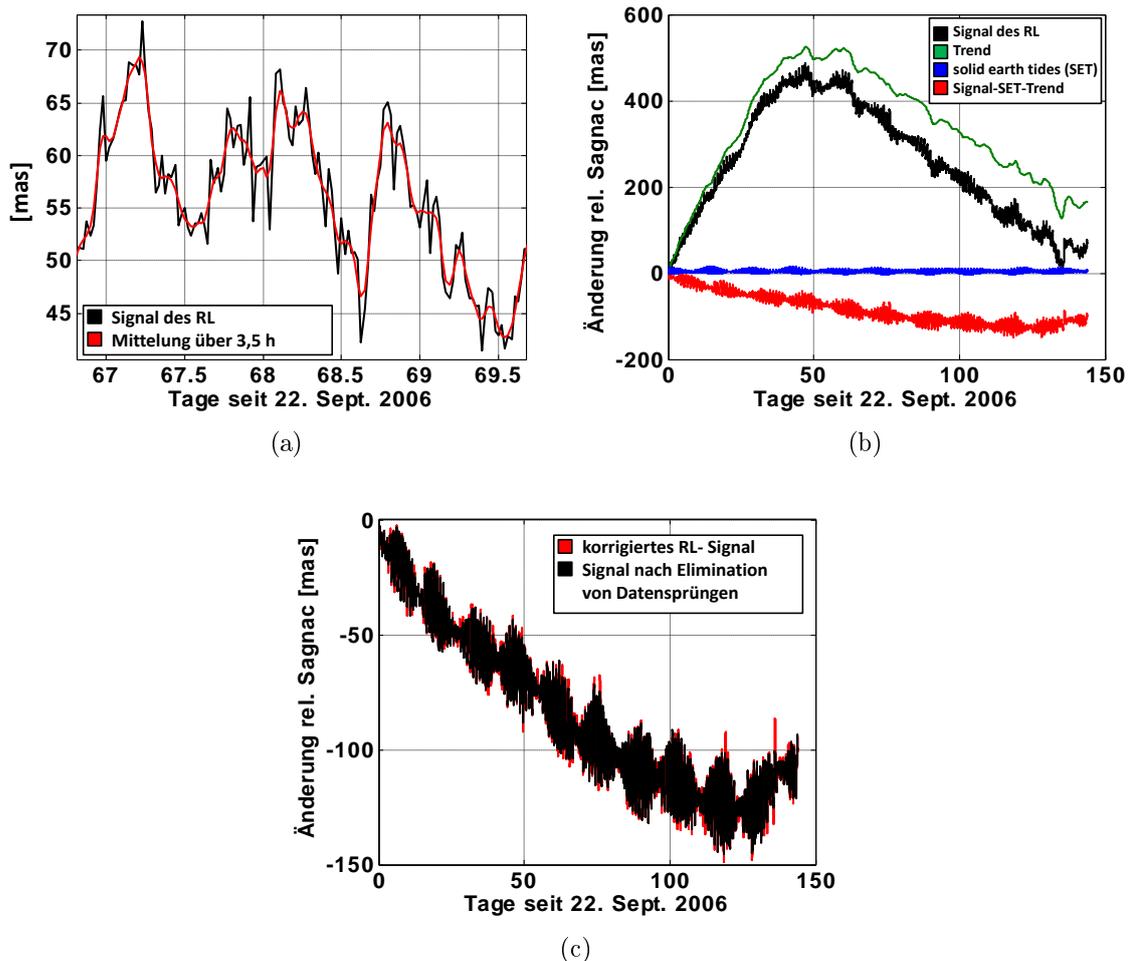


Abbildung 33: Bearbeitungsschritte der Zeitreihe des Ringlasers. Elimination des Messrauschens durch Mittelung über 3,5 h (a), Berechnung und Abziehen eines Trends und der festen Erdzeiten (b), sowie Reduktion von Datensprüngen (c)

Arbeit erwähnt wurde, weist der Ringlaser noch nicht die nötige Stabilität über einen längeren Zeitraum auf, sondern ist besonders im täglichen und subtäglichen Bereich interessant. Um beide Zeitreihen vergleichen zu können, wird von den Daten des Ringlasers der Trend abgezogen und gegebenenfalls das Signal für die mittlere Polbewegung überlagert. Die Berechnung des Trends erfolgt erneut über die *smoothing* Funktion, diesmal

über einen längeren Zeitraum, nämlich 48 Stunden, entsprechend 96 Datenpunkten. Um nicht die gesuchten Signale durch die Trendbildung zu verfälschen, empfiehlt es sich, vor der Mittelung den Einfluss der festen Erdzeiten sowie die erwarteten Signale der täglichen Polbewegung von der Datenreihe zu subtrahieren (Abbildung 33 (b)). Hat man das Signal des Ringlasers soweit bearbeitet, ist die erwartete tägliche Polbewegung schon eindeutig erkennbar. Für eine weitere Verbesserung des Ergebnisses wurde in die Routine ein Verfahren zur Elimination der noch vorhandenen Ausreißer implementiert. Dabei wird zuerst durch Differenzbildung die zeitliche Änderung der Messreihe berechnet und eine harmonische Gezeitenanalyse durchgeführt. An jenen Stellen, an denen die Abweichung zwischen den Messwerten und jenen, von der Gezeitenanalyse vorhergesagten Werten einen Grenzwert überschreitet, wird ersterer durch letzteren ersetzt. Durch kumulative Summenbildung erfolgt die Rückintegration der Messreihe. Das Ergebnis ist in Abbildung 33 (c) dargestellt.

12.2 Vergleich mit berechneten Werten

Nach der Bearbeitung der Ringlaserdaten laut Kap. 12.1 enthält das Signal hauptsächlich nur mehr Variationen, die von Erdrotationsschwankungen herrühren. Somit kann der angestrebte Vergleich mit dem berechneten Erdrotationssignal erfolgen.

Bei dem Vergleichssignal handelt es sich um ein Ergebnis des Programms ERV, bei dem aus täglichen Erdorientierungsparametern des IERS alle 30 Minuten der Erdrotationsvektor berechnet und in die entsprechende relative Änderung der Sagnacfrequenz für Wetzell umgerechnet worden ist. Wie vom IERS empfohlen, wurden bei der Interpolation der Erdorientierungsparameter der Einfluss der ozeanischen Gezeiten sowie die Polzeiten mittels entsprechender Modelle berücksichtigt.

Bei der Überlagerung der beiden Zeitreihen ist eine ausgezeichnete Übereinstimmung erkennbar (Abbildung 34 (a)). Die Abweichungen liegen über den betrachteten Zeitraum von 150 Tagen meist unter ± 5 mas, einzelne Ausreißer betragen bis max ± 8 mas (b). Mithilfe der Spektralanalyse des Differenzsignals (c) wurde erkannt, dass die größten Abweichungen noch im täglichen bzw. halbtäglichen Bereich zu finden sind. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass für die Berechnung der Erdrotation nur tägliche Messwerte verwendet wurden und das subtäglichen Signal neben Interpolation hauptsächlich aus dem Präzessions/Nutationsmodell stammt, die Ringlaserdaten über 3,5 Stunden gemittelt sind und Signale über 48 Stunden entfernt worden sind.

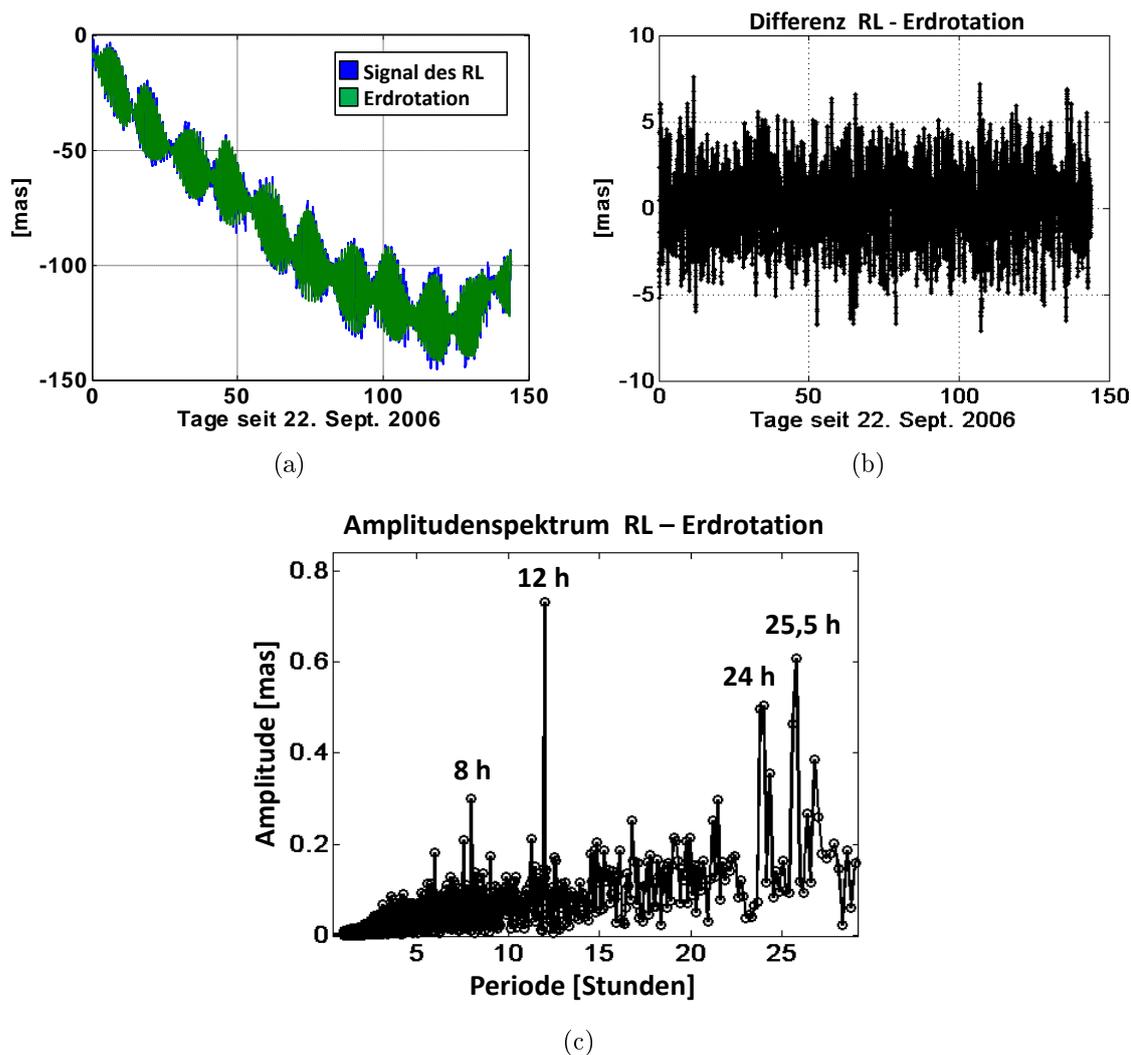


Abbildung 34: Vergleich der Zeitreihe des Ringlasers mit der berechneten/gemessenen Erdrotation im Zeitbereich (a, b) und im Spektralbereich (c)

13 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde ein Programm erstellt und präsentiert, mit dem aus herkömmlichen Messungen der Erdrotation der momentane Erdrotationsvektor berechnet und mit den Messungen des Ringlasers verglichen und kombiniert werden kann. Für eine Auswahl an Datensätzen wurden die damit berechneten Komponenten der Erdrotation mit den vorhandenen Modellen und Theorien verglichen und etwaige Abweichungen hervorgehoben.

Aus dem heute verwendeten Präzessions-/Nutationsmodell wurden die Opolzerterme berechnet und die Unterschiede zum Modell von Brzeziński dargestellt. Anhand des Einflusses der ozeanischen Gezeiten wurde die frequenzabhängige Amplitudenverstärkung bzw. -schwächung beim Übergang von geodätischer auf geophysikalische Polbewegung her-

ausgearbeitet und verdeutlicht. Bei einem Vergleich von hochauflösenden Messwerten mit den standardmäßigen Lösungen sind Signale vorhanden, die noch durch kein Modell erklärt werden können. Bei den kurzen betrachteten Zeiträumen stellt sich natürlich die Frage der Signifikanz gegenüber dem vorhandenen Messrauschen, für schlüssige Interpretationen sind wohl noch weitere Messungen über längere Zeiträume notwendig. Wohl unbestritten scheint allerdings das in beinahe allen Analysen auftretende Signal mit halbtäglicher Periode zu sein, welches nun mit seiner Ursache in Verbindung gebracht werden muss.

Es konnte gezeigt werden, dass die Interpretation der Erdrotation bezüglich des wahren Rotationspols (IRP) gegenüber der Verwendung des „Gebrauchspols“ CIP große Vorteile mit sich bringt. Wie der von Brzeziński vorgestellte mathematische Zusammenhang zeigt (Gleichung 42), werden die auftretenden Polbewegungen von beiden Systemen mit unterschiedlichen Frequenzen wahrgenommen. In Abbildung 35 ist der Verlauf dieses Faktors

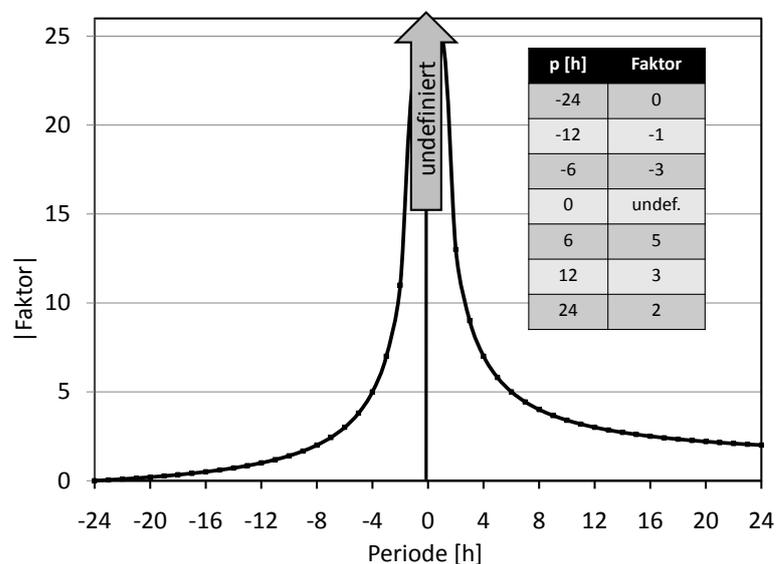


Abbildung 35: Frequenzabhängiger Verlauf des Faktors beim Übergang vom CIP auf den IRP. $m_{IRP} = \text{Faktor} \cdot p_{CIP}$

für den subtäglichen Bereich dargestellt, wobei aus Gründen der besseren Darstellung im retrograden Frequenzband auf das negative Vorzeichen verzichtet worden ist. Es ist klar zu erkennen, dass die Sensitivität im prograden Bereich mindestens verdoppelt wird, im retrograden Band Signale mit Perioden zwischen -24 und -12 Stunden zwar gedämpft, jene mit kürzeren Perioden jedoch ebenfalls verstärkt werden. Obwohl die Verstärkung natürlich auch auf das Messrauschen wirkt, hat dies für lange Zeitreihen wenig Einfluss und die Möglichkeit, signifikante Signale in diesem Bereich zu entdecken wird durch den Übergang vom CIP auf den IRP enorm gesteigert.

Da auch aus den Messreihen des Ringlasers die Polbewegung des IRP abgeleitet wird,

sind auch bei diesem neuartigen Messverfahren die eben erläuterten Vorteile im hochfrequenten Bereich gegeben. Durch die Möglichkeit der kontinuierlichen, hoch auflösenden Messung ist der Ringlaser prädestiniert für einen großen Beitrag zu neuen Erkenntnissen über subtägliche Erdrotationsschwankungen. Obwohl damit keine Informationen über Veränderungen der LOD gewonnen werden können, und es aufgrund der Drift und des starken Einflusses von lokalen Effekten schwierig ist, punktuelle Veränderungen der Erdrotation zu erkennen, ist der Ringlaser für die Erkennung von periodischen Signalen im subtäglichen Frequenzband bestens geeignet. Zur Zeit sind die langen Zeitserien noch mit einem starken Rauschen behaftet, das während der Auswertung berücksichtigt werden muss, aber rein theoretisch kann das derzeitige Auflösungsvermögen noch um einen Faktor 10 verbessert werden.

Allgemein kann man sagen, dass das Ziel dieser Arbeit, Messungen von der VLBI und vom Ringlaser im subtäglichen Bereich zu kombinieren, erreicht worden ist. Auf der Generalversammlung der EGU 2008 in Wien wurden von Mendes Cerveira Ergebnisse einer Auswertung von Ringlaserdaten präsentiert, die keinen Zweifel mehr an der Eignung des Ringlasers zur Messung der Erdrotation übrig lassen. Ein Teil der Berechnungen wurde dabei mit dem hier vorgestellten Programm durchgeführt, wodurch ein gewisser wissenschaftlicher Nutzen dieser Diplomarbeit bestätigt worden ist. Aber auch ohne Hinzunahme des Ringlasers eröffnet der Übergang auf den Erdrotationsvektor durch die Amplitudenverstärkung neue Möglichkeiten. Wie es scheint, sind einige der bisher verwendeten Modelle nicht ganz korrekt und müssen für eine weitere Genauigkeitssteigerung in der Polbestimmung verbessert werden.

Eine große Chance für eine exakte Bestimmung der erhaltenen Restsignale liegt natürlich in neuen, besseren Messungen. Im August 2008 läuft das CONT08 Experiment, bei dem 14 Tage lang kontinuierlich VLBI Messungen durchgeführt werden und somit die Bestimmung hochauflösender Erdorientierungsparameter für diesen Zeitraum möglich sein wird. Wenn in dieser Zeit auch der Ringlaser gute Messungen durchführt, wird von einer gemeinsamen Auswertung einiges zu erwarten sein.

A Literaturverzeichnis

- Beutler, G.**, *Methods Of Celestial Mechanics Vol. II: Application to Planetary System, Geodynamics and Satellite Geodesy*, Kap. 2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- Bizouard** E-mail, persönl.
- Bretterbauer, K** und H. Schuh (Ergänzung), *Höhere Geodäsie, Skriptum zur Vorlesung*, Institut für Geodäsie und Geophysik, Höhere Geodäsie, Oktober 2004, Teil 1, Kap. 2.8
- Brzeziński, A.**, *Contribution to the theory of polar motion for an elastic earth with liquid core* in *Manuscripta Geodaetica*, 11, 226-241, Springer Verlag, 1986
- Brzeziński, A.** *Forced polar motion of the instantaneous rotation axis*, presented at FGS Workshop 2004 on Ringlaser Gyroscopes and Earth Rotation in Höllenstein/Wetzell, 2004
- Brzeziński, A.**, *Role of VLBI for Investigating Earth Rotation*, IVS 2006 General Meeting Proceedings, S. 20-29
<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2006/brzezinski>
- Capitaine, N.**, *Comparison of „Old” and „New” Concepts: The Celestial Intermediate Pole and Earth Orientation Parameters* in *Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions*, Observatoire de Paris, Paris, France, 18-19 April 2002. Capitaine et al. (Hrsg.), (IERS Technical Note; 29) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2002. 134 pp., paperback, ISBN 3-89888-866-5 (print version)
- Capitaine, N.**, P. T. Wallace und D. D. McCarthy, *Expressions to implement the IAU 2000 definition of UT1* in *Astronomy & Astrophysics 406*, S. 1135-1149, 2003
- Chao, B. F.**, *As the World Turns* in *EOS*, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 66, Nr. 46, S. 766-770, 1985
- Chao, B. F.**, *As the World Turns II* in *EOS*, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 72, S. 550-551, 1991
- Chao, B. F.**, *Anthropogenic impact on global geodynamics due to reservoir water impoundment* in *Geophysical Research Letters*, Vol. 22, Nr. 24, S. 3529-3532, 1995
- Chao, B. F.** und R. S. Gross, *Changes in the Earth’s rotational energy induced by earthquakes* in *Geophys. J. Int.*, 122, S. 776-783, 1995

- Dehant, V.**, O. de Viron und J.-P. Barriot, *Geophysical excitation of the Earth orientation parameters EOP and its contribution to GGOS* in *Journal of Geodynamics*, 40, S. 394-399, 2005
- EOP** Product Center, *Website*; <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/> (Stand 2008)
- Eubanks, T. M.**, *Variations in the Orientation of the Earth* in *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics, Geodynamics 24*, American Geophysical Union S. 1-54, 1993
- Frede, V.** und V. Dehant, *Analytical versus semi-analytical determinations of the Oppolzer terms for a non rigid Earth* in *Journal of Geodesy*, 73, S. 94-104, Springer-Verlag, 1999
- Gross, R. S.**, *Earth Rotation Variations - Long Period* in *Treatise on Geophysics*, Vol. 3, Physical Geodesy, 2007
- Haas, R.** und J. Wunsch, *Sub-diurnal earth rotation variations from the VLBI CONT02 campaign* in *Journal of Geodynamics*, 41, 94-99, 2006
- IERS**, *Bulletin C*, <http://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulc/> (Stand: Feb. 2008)
- IERS**, *Conventions 2003*, D. McCarthy und G. Petit (Hrsg.), *IERS Technical Note No. 32*, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2004 (elektron. Version unter <http://www.iers.org/iers/products/conv/>)
- IERS**, *Explanatory Supplement to IERS Bulletins A and B*, 2004;
<http://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bulb/explanatory.html> (Stand 2008)
- IERS**, *Website*; www.iers.org (Stand 2008)
- ICRS**, *Website*; <http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/> (Stand 2008)
- ITRS**, *Website*; <http://itrf.ensg.ign.fr/> (Stand 2008)
- IVS**, *Website*; <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/> (Stand 2008)
- Klügel, T.** *Bestimmung lokaler Einflüsse in den Zeitreihen inertialer Rotationssensoren*, Schlußbericht zum DFG-Forschungsprojekt, Fundamentalstation, 2003
- Klügel, T.**, U. Schreiber, W. Schlüter, A. Velikoseltsev und M. Rothacher, *Estimation of diurnal polar motion terms using ring laser data*, Proceedings of the "Journées 2005 Systèmes de Référence Spatio-Temporels", A. Brzezinski, N. Capitaine and B. Kolaczek (eds.), Space Research Centre PAS, Warsaw, Poland, 2006

- Klügel**, T., W. Schlüter, U. Schreiber und A. Velikoseltsev, *Improved Measurement of short-periodic Polar Motion by the Wettzell G Ring Laser*, Poster, präsentiert auf der Generalversammlung der EGU 2008 in Wien, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2008
- Mathews**, P. M., T. A. Herring und B. A. Buffett, *Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior* in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, Nr. B4, 2068, 2002
- Melchior**, P., *For a clear terminology in the polar motion investigations in Nutation and the Earth's Rotation*, S. 17-21, E. P. Fedorov, M. L. Smith, P. L. Bender (Hrsg.), IAU, 1980
- Mendes Cerveira**, P. J., R. Weber und H. Schuh, *The instantaneous Earth rotation - still inaccessible?* in *Vermessung & Geoinformation 2/2007*, S. 113-120, 2007
- Mendes Cerveira**, P. J., H. Spicakova, H. Schuh, T. Klügel, U. Schreiber und A. Velikoseltsev, *Earth rotation parameters from Very Long Baseline Interferometry and ring laser observables*, akzeptiert für *Advances in Geosciences*, 2008
- Mendes Cerveira**, P. J., J. Böhm, H. Schuh, T. Klügel, A. Velikoseltsev, K. U. Schreiber und A. Brzeziński, *Using Very Long Baseline Interferometry and ring laser for Monitoring Earth Rotation*, noch nicht veröffentlicht
- Nothnagel**, A., *Radiointerferometrische Beobachtungen zur Bestimmung der Polbewegung unter Benutzung langer Nord-Süd-Basislinien*, *Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C: Dissertationen - Heft Nr. 368*, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, 1991
- Rothacher**, M., *Variationen der Erdrotation: von Stunden zu Jahrhunderten*, Wissenschaftliches Kolloquium der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, 2003, <http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~fesg/web/forschung/uebersicht/rotation/rotation.php> (2008)
- Schödlbauer**, A., *Geodätische Astronomie*, Walter de Gruyter Berlin, 2000
- Schreiber**, K. U., T. Klügel und G. E. Stedman, *Earth tide and tilt detection by ring laser gyroscope* in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, Nr. B2, S. 2132, 2003
- Schreiber**, K. U., A. Velikoseltsev, M. Rothacher, T. Klügel, G. E. Stedman und D. L. Wiltshire, *Direct measurement of diurnal polar motion by ring laser gyroscopes* in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, Nr. B0, S. 6405, 2004

- Schuh, H.**, *Geodetic Analysis Overview*, First International VLBI Service General Meeting, Kötzing, 23.02.2000
- Schuh, H.** und P. J. Mendes Cerveira, *Erdrotation und globale dynamische Prozesse*, Unterlagen zu LV 128.010 an der TU Wien, WS 2007, <http://mars.hg.tuwien.ac.at/~mendes/lectures.html>
- Sovers, O. J.**, J. L. Fanselow und C. S. Jacobs, *Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results* in *Reviews of Modern Physics*, Vol. 70, Nr. 4, S. 1393-1453, 1998
- Tisserand, F.**, *Traité de Mécanique Céleste*, Band 2: *Théorie de la figure des corps célestes et de leur mouvement de rotation*, Paris, Gauthier-Villars et fils, imprimeur-libraires, 1891
- Vicente, R. O.**, *Old and new methods of observing polar motion* in *Rotation of the Earth*, S. 133-135, P. Melchior, und S. Yumi (Hrsg.), IAU, 1972
- Vicente, R. O.**, *The future of the researches about the earth's rotation* in *Time and the Earth's Rotation*, S. 1-6, D. D. McCarthy und J. D. Pilkington (Hrsg.), IAU, 1979
- Vicente, R. O.**, *The earth's constitution and the nutations* in *Nutation and the Earth's Rotation*, S. 139-151, E. P. Fedorov, M. L. Smith, P. L. Bender (Hrsg.), IAU, 1980
- Wahr, J.**, *Geodesy and Gravity, Class Notes*, S. 287, Samizdat Press, 1996
- Wettzell, Website**; <http://www.fs.wettzell.de/> (Stand 2008)

B Lebenslauf

Lucia Maria Plank

Nationalität: Österreich

geboren am 3. Juni 1984 in Wels

Eltern: Johann Plank und Dipl. Ing. Maria Plank

1990-1994: Volksschule 10 in Wels

1994-2002: Gymnasium BG Brucknerstraße Wels

Juni 2002: Ablegung der Reifeprüfung mit ausgezeichnetem Erfolg am BG Brucknerstraße

Oktober 2002: Immatrikulation an der Technischen Universität Wien
Inskription der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation

Jänner 2005: Ablegen der 1. Diplomprüfung

September 2007 - März 2008: ERASMUS-Studienaufenthalt an der Chalmers Tekniska Högskola in Göteborg, Schweden

seit März 2008: Fortsetzung des Studiums an der TU Wien, Studienzweig: Geodäsie und Geophysik