



Sigrid Böhm, Wien

Der Einfluss der Gezeiten auf die Erdrotation

Kurzfassung

Die Transformation zwischen einem himmelfesten und einem erdfesten Koordinatensystem ist von essentieller Bedeutung nicht nur für die geodätischen Weltraumverfahren, sondern generell für alle präzisen Positionierungs- und Navigationsaufgaben. Der Übergang von einem System in das andere erfordert eine gute Kenntnis der so genannten Erdorientierungsparameter (EOP). Die EOP beschreiben die Lage einer Referenzachse im Raum und relativ zum Erdkörper und den momentanen Winkel der Erdrotation, also die Verdrehung eines Bezugsmeridians. In diesem Artikel wird erläutert auf welche Weise die Verbindung zwischen zälestischen und terrestrischen Positionen nach aktuellen Konventionen herzustellen ist und wie die zugehörigen Transformationsparameter definiert sind. Zudem werden die wichtigsten äußeren und geophysikalischen Einflüsse, die Schwankungen der EOP hervorrufen, und ihre Handhabung behandelt. Im Detail wird auf die Effekte der Gezeiten der festen Erde, der Ozeane und der Atmosphäre auf die Orientierung der Erde eingegangen. Als Einblick in aktuelle Erdrotationsforschung wird eine Studie vorgestellt, welche die Überprüfung eines konventionellen Modells für die Auswirkungen langperiodischer fester Erdezeiten und Ozeangezeiten auf die Weltzeit durch Vergleich mit Beobachtungen der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) zum Ziel hatte. Die Untersuchung ergab Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung von mehr als 40 Mikrosekunden, was in etwa 2 cm an der Erdoberfläche entspricht.

Schlüsselwörter: Erdrotation, Gezeiten, Geodätische Weltraumverfahren

Abstract

The transformation between space-fixed and Earth-fixed coordinate systems is of significant importance not only for space geodetic techniques but in general for all precise applications of positioning and navigation. The transition from one system to the other requires an adequate knowledge of the so called Earth orientation parameters (EOP). The EOP specify the attitude of a reference axis in space and with respect to the Earth and the instantaneous Earth rotation angle, which is actually the phase of a prime meridian. This article deals with the mode of establishing the connection between celestial and terrestrial positions according to present conventions and the definition of the respective transformation parameters. Furthermore the most important external and geophysical causes, which induce EOP variations and their handling is examined. Effects of solid Earth tides, ocean tides and atmospheric tides on Earth orientation are discussed in more detail. To give an insight into recent Earth rotation research an investigation is presented, the purpose of which was the revision of a conventional model for the impact of long periodic solid Earth tides and ocean tides on universal time by means of comparison to observations of Very Long Baseline Interferometry (VLBI). The investigation revealed discrepancies between model and observation of more than 40 microseconds, corresponding to approximately 2 cm on the Earth surface.

Keywords: Earth rotation, Tides, Space Geodetic Techniques

1. Einleitung

Fast alle Aufgaben der hochgenauen Positionierung und Navigation, die extraterrestrische Objekte als Referenzen verwenden, erfordern eine ausreichende Kenntnis der Lage dieser Objekte in Bezug zu Beobachtungsstationen auf der Erdoberfläche. Die Positionen der Stationen sind gegenüber einem himmelfesten oder raumfesten Bezugssystem zeitlichen Veränderungen unterworfen. Diese sind in großem Ausmaß bedingt durch die tägliche Umdrehung der Erde um ihre eigene Achse und ihre jährliche Revolution um die Sonne und in kleinerem Umfang durch die Unregelmäßigkeiten der beiden Bewegungen. Die Bestimmung der Bahn der Erde um die Sonne ist Gegenstand der so genannten Ephemeridenrechnung und soll im Rahmen dieses Artikels

nicht weiter behandelt werden. Für präzise Navigationsaufgaben und die Analyse der Messungen geodätischer Weltraumverfahren ist in erster Linie die Orientierung der Erde im Raum von Bedeutung. In der Praxis ist dies gleichzusetzen mit der Transformation zwischen einem raumfesten, geozentrischen Koordinatensystem und einem erdfesten Koordinatensystem. Die Orientierung der Erde im Raum und somit auch die Transformation unterliegen periodischen und unregelmäßigen Änderungen, die einerseits durch äußere Einwirkung der Himmelskörper und andererseits durch Vorgänge im Erdinneren oder nahe der Erdoberfläche hervorgerufen werden. Rein geometrisch betrachtet könnte der Übergang von einem raumfesten Bezugssystem in ein erdfestes Bezugssystem ganz einfach durch Drehung

um drei Winkel durchgeführt werden. Eine solche Vorgehensweise ist jedoch wenig praktikabel, da sich die drei Parameter einer derartigen Transformation sehr schnell ändern würden. Ein weiterer Nachteil ist, dass das Studium einzelner Anregungsmechanismen und Eigenschaften des Erdkörpers, die zu Rotationsschwankungen führen, nur erschwert möglich wenn nicht gar unmöglich wäre. Aus wissenschaftlichen und praktischen Gründen hat sich daher die Realisierung der Transformation mit fünf Parametern durchgesetzt. Je zwei Parameter beschreiben die Lage einer festgelegten Referenzachse bezüglich des raumfesten Systems sowie bezüglich des erdfesten Systems. Der fünfte Parameter gibt den aktuellen Winkel der Erdrotation, also die Phase eines erdfesten Bezugsmeridians wieder. Die Vorhersage aller Transformationsparameter für jeden Zeitpunkt ist der wünschenswerte Idealfall. Eine genaue Modellbildung ist aber bis dato nur für jene Komponenten möglich, die vorwiegend von den gut bekannten gravitativen Einflüssen der anderen Himmelskörper abhängen und nur in geringem Maße von geophysikalischen Eigenschaften und Prozessen, wie Mantelanelastizität, Beschaffenheit von innerem und äußerem Erdkern und großräumigen Massenverlagerungen und Strömungen in Ozeanen oder in der Atmosphäre. Die so hervorgerufenen Erdorientierungsschwankungen, die sich hauptsächlich in Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit und der Lage der Referenzachse in Bezug zum erdfesten System manifestieren, werden durch Beobachtung mit geodätischen Weltraumtechniken ermittelt. Im Hinblick auf eine komplette Prädiktion der Orientierung der Erde im Raum wird aber gleichzeitig auch die Verbesserung vorhandener Modelle und Theorien auf Basis der beobachteten Gegebenheiten angestrebt. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich überblicksmäßig mit dem Einfluss der Gezeiten auf die Transformation zwischen raumfestem und erdfestem Referenzsystem und beschreibt als Beispiel aus aktueller Forschung eine Gegenüberstellung von Modellierung und Beobachtung gezeiteninduzierter Variationen in der Weltzeit.

2. Definition der Erdorientierungsparameter

Als Erdorientierungsparameter (EOP) bezeichnet man jene Elemente, mit denen die Transformation zwischen raumfestem und erdfestem Bezugssystem vollzogen wird. Die Realisierung solcher Referenzsysteme durch Festlegung der Koordinaten ausgewählter Himmelsobjekte bzw. terrestrischer Beobachtungsstationen nennt

man Referenzrahmen. Die Umsetzung und Aufrechterhaltung der Referenzrahmen ist Aufgabe des internationalen Erdrotations- und Referenzsystemdienstes (IERS [1]). Diese so genannten konventionellen Referenzrahmen sind der himmelsfeste International Celestial Reference Frame (ICRF) und der erdfeste International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Die aktuelle Version des ICRF wird als zweite Realisierung des internationalen himmelsfesten Referenzrahmens, ICRF2 [2], bezeichnet. Da sich die nächste Ausgabe des ITRF, der ITRF2008, nach wie vor in Vorbereitung befindet, ist die momentan offizielle Ausführung noch ITRF2005 [3].

2.1 Transformation nach IAU 2000 Resolutionen

Die genaue Definition der EOP hängt von der Art der gewählten Transformation ab. In den Konventionen des IERS [4] wird die Durchführung der Transformation gemäß den Resolutionen der International Astronomical Union (IAU) empfohlen (IAU Resolutions 2000 [5]). Der Übergang vom raumfesten (CRS) in das erdfeste System (TRS) wird durch eine Abfolge zeitabhängiger Drehmatrizen beschrieben:

$$[\text{TRS}] = \underbrace{R_1(-y_p)}_{W(t)} \cdot \underbrace{R_2(-x_p)}_{R(t)} \cdot \underbrace{R_3(s')}_{R(t)} \cdot \underbrace{R_3(\theta)}_{R(t)} \cdot \underbrace{R_2(X)}_{Q(t)} \cdot \underbrace{R_1(Y)}_{Q(t)} \cdot \underbrace{R_3(s)}_{Q(t)} \cdot [\text{CRS}] \quad (1)$$

Mit $W(t)$ (W steht für das englische Wort „Wobble“) wird die Polbewegungsmatrix bezeichnet. Sie enthält als Parameter die Koordinaten x_p , y_p des Referenzpols CIP (Celestial Intermediate Pole) im erdfesten System und den Korrekturwinkel s' , der die Position des Terrestrial Intermediate Origin (TIO) auf dem Äquator des CIP wiedergibt. Terrestrial (TIO) und Celestial Intermediate Origin (CIO) realisieren im jeweiligen System einen momentanen Bezugsmeridian. Diese Begriffe sind Bestandteil des Transformationskonzeptes mit dem so genannten Non-Rotating Origin, welches das ältere Konzept der Transformation mit Ekliptik und Äquinoktium abgelöst hat [4]. $R(t)$ ist die Erdrehungsmatrix, die den Earth Rotation Angle θ , den Winkel zwischen TIO und CIO, beinhaltet. Die Präzessions-/Nutationsmatrix wird mit $Q(t)$ abgekürzt. Sie umfasst die Drehungen um die Winkel X und Y , die Koordinaten des CIP im himmelsfesten System, und um den Korrekturwinkel s , der den CIO auf dem Äquator des CIP positioniert. Die für die Erdrotationsforschung relevante Größe $d\text{UT1}$ kann über eine lineare Beziehung aus dem Erdrotationswinkel θ abgeleitet werden. $d\text{UT1}$ entspricht der Differenz

zwischen der auf der Erdrotation basierenden Weltzeit UT1 und der koordinierten Weltzeit UTC, die durch Atomuhren realisiert wird. Die Weltzeit unterliegt periodischen Schwankungen, die hauptsächlich durch Einflüsse der Gezeiten der festen Erde und Bewegungen in der Atmosphäre geprägt sind. In geringerem Ausmaß spielen auch Effekte eines flüssigen Erdkerns und ozeanische Strömungen und Gezeiten eine Rolle. Aus Änderungen in dUT1 lassen sich direkt Änderungen in der Rotationsgeschwindigkeit und in der Tageslänge (length of day, LOD) ableiten. Die Größe dUT1 kann unmittelbar nur mit Very Long Baseline Interferometry (VLBI) beobachtet werden. Den Satellitenverfahren, wie GNSS (Global Navigation Satellite System) oder SLR (Satellite Laser Ranging) ist aufgrund der Korrelation der Rotationsphase der Erde (UT1) mit Satellitenbahnparametern nur die zeitliche Ableitung von dUT1, das bereits erwähnte LOD, zugänglich.

Im Falle der Verwendung der Transformation nach IAU Resolutionen 2000 repräsentieren die fünf Größen $\{x_p, y_p, dUT1, X, Y\}$ die Erdorientierungsparameter. Den Teilsatz $\{x_p, y_p, dUT1\}$ nennt man üblicherweise Erdrotationsparameter (ERP).

2.2 Die Bewegung des Celestial Intermediate Pole

Der CIP ist der Referenzpol, auf welchen sich die Messungen geodätischer Weltraumverfahren beziehen, er definiert also quasi die beobachtete Achse. Dies ist eine reine Festlegung, die durch eine entsprechend angepasste Präzessions-/Nutationstheorie realisiert wird. Die Richtung des CIP entspricht keiner physikalischen Achse, wie etwa der Rotationsachse, der Figurenachse oder der Drehimpulsachse, kann jedoch rechnerisch mit all diesen Achsen in Beziehung gebracht werden. Per Definition ist der CIP eine Art Zwischenpol, der die Bewegung des Poles des TRS bezüglich des CRS in einen zälestischen und einen terrestrischen Teil aufspaltet. In Abbildung 1 ist diese Unterteilung skizziert.

Die Aufteilung erfolgt nach den Perioden der Bewegungen des CIP:

- der zälestische Teil (Präzession/Nutation, $\{X, Y\}$) umfasst alle Bewegungen mit Perioden > 2 Tage, betrachtet aus der Sicht des himmelfesten Systems. Dies ist gleichbedeutend mit Frequenzen zwischen $-0,5$ und $+0,5$ Zyklen pro Sterntag, wobei das Minuszeichen für retrograde Bewegungen, das Pluszeichen für prograde Bewegungen steht. Prograd bezeichnet

eine Bewegung im Sinne der Erdrotation, retrograd, entgegengesetzt;

- der terrestrische Teil (Polbewegung, $\{x_p, y_p\}$) beinhaltet alle Bewegungen außerhalb des retrograden täglichen Bereiches im TRS. D.h. Frequenzen unter $-1,5$ und über $-0,5$ Zyklen pro Sterntag.

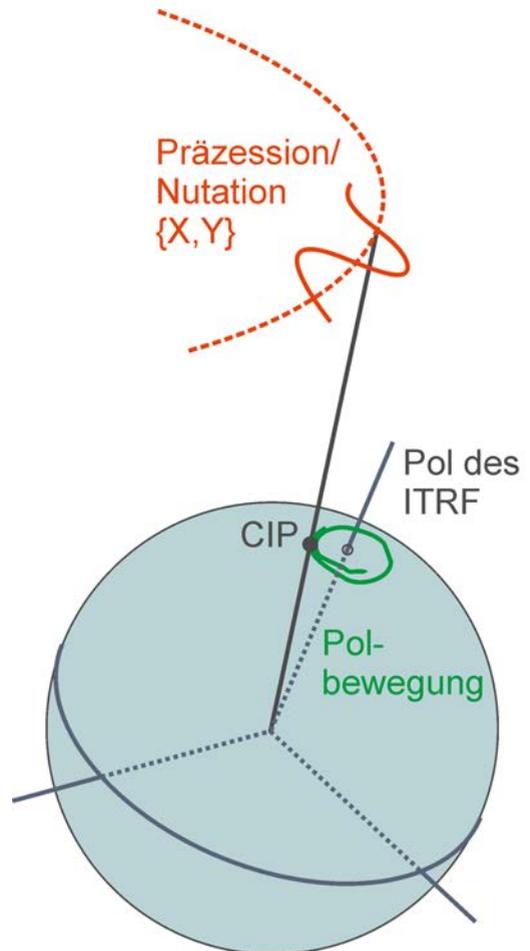


Abb. 1: Präzession/Nutation und Polbewegung des CIP

Zur besseren Veranschaulichung zeigt Abbildung 2 eine [4] entlehnte schematische Darstellung der konventionellen Unterscheidung zwischen Präzession/Nutation und Polbewegung des CIP nach Frequenzen bzw. Perioden. Zwischen der Betrachtung der Bewegung bezüglich des TRS und bezüglich des CRS besteht eine Verschiebung um einen Zyklus pro Sterntag, aufgrund der Rotation des TRS gegenüber dem CRS.

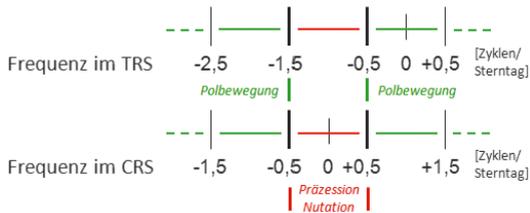


Abb. 2: Schema der Frequenzaufteilung von Präzession/Nutation und Polbewegung des CIP

Der zälestische Bewegungsanteil (Präzession/Nutation) des CIP kann zum Großteil aus einem konventionellen Präzessions-/Nutationsmodell berechnet bzw. präzidiert werden. Als gegenwärtig bestes Modell wird IAU 2006/2000A in der online verfügbaren aktualisierten Version der IERS Konventionen [6] empfohlen. Verbleibende Restanteile der zälestischen Bewegung können mittels VLBI beobachtet werden und sind vom IERS in Form der so genannten Celestial Pole Offsets $\{\delta X, \delta Y\}$ erhältlich. Diese Modellzuschläge rühren von noch unzureichend modellierbaren Effekten, wie dem Phänomen der Free Core Nutation (FCN) her. Die FCN ist eine Eigenschwingung des Erdkörpers, die ihre Ursache in einer Abweichung der Rotationsachse des Mantels von der Rotationsachse des Erdkerns hat. Diese retrograde Bewegung hat eine Periode von ca. 430 Tagen im CRS und eine variierende Amplitude von bis zu 200 Mikrobogensekunden, was in etwa 6 mm an der Erdoberfläche entspricht. Ähnlich, wie bei einer weiteren freien Schwingung der Erde, dem Chandler Wobble (CW), sind auch die Anregungsmechanismen der FCN nicht hinreichend bekannt, um den Verlauf der Bewegung exakt vorhersagen zu können.

Der CW ist mit einer Amplitude von bis zu 6 m an der Erdoberfläche die größte Komponente der terrestrischen Bewegung (Polbewegung) des CIP. Das zweitgrößte Signal in der Polbewegung ist eine durch Druckschwankungen in der Atmosphäre verursachte jährliche Schwingung, deren Amplitude ca. 3 m ausmachen kann. Kleinere Schwankungen der Polbewegung werden durch Massenverlagerungen und Strömungen in den Weltmeeren, sowie die Gezeiten der festen Erde, der Ozeane und auch der Atmosphäre induziert. Die gesamte Polbewegung ist von vielen schwer erfassbaren und noch nicht genauer modellierbaren Faktoren abhängig. Auf der einen Seite sind dies globale dynamische Prozesse in Atmosphäre, Wasserhaushalt und im Erdinneren, auf der anderen Seite die rheologischen Eigenschaften (beschrieben durch Lovesche Zahlen) des Erdkörpers, die die Reaktion desselben auf

äußere Einwirkungen bestimmen. Mangels angemessener Vorhersagemöglichkeit wird die Polbewegung mit geodätischen Weltraumverfahren beobachtet und vom IERS in kombinierten Serien mit täglicher Auflösung veröffentlicht.

3. Gezeiteneffekte

Unter dem Begriff Gezeiten versteht man durch Gravitationswechselwirkungen mit Mond, Sonne und Planeten hervorgerufene periodische Deformationen der festen Erde, Änderungen der Meereshöhen und der atmosphärischen Auflast. Die Perioden, mit welchen diese Phänomene auftreten, entsprechen den Intervallen der Wiederholung bestimmter Bahnpositionen der Himmelskörper. Sowohl die Bahnen der Himmelskörper und damit die Gezeitenperioden, als auch die auf die Erde wirkenden Kräfte, in Form des Gezeitenpotenzials, sind heutzutage sehr gut bekannt. Verbesserungspotenzial gibt es dahingegen bei der Vorhersage der Reaktionen des Erdkörpers, der Ozeane und der Atmosphäre auf diese Einflüsse und die Berechnung ihrer Auswirkungen auf das Rotationsverhalten der Erde. Gezeiteninduzierte Erdrotationschwankungen treten mit Perioden von wenigen Stunden bis hin zu 18,6 Jahren auf (letzteres entspricht der Umlaufzeit des aufsteigenden Knotens der Mondbahn). Ihre Dimensionen (an der Erdoberfläche) reichen im bis zu monatlichen Periodenbereich von wenigen Zentimetern in der Polbewegung bis zu einem halben Meter in der Weltzeit. Die Amplitude der längsten Schwingung (18,6 Jahre) erreicht sogar einen Wert von ca. 170 ms, was beinahe 80 Metern am Äquator entspricht. Neben den periodischen Effekten ist der säkulare Effekt der Gezeitenreibung zu erwähnen, der infolge der verzögerten Ausbildung der Flutberge zu einer Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit und Zunahme der Tageslänge um ca. 2 ms pro Jahrhundert führt.

Die Abbildungen 3 und 4 geben einen schematischen Überblick der Größenordnungen der periodischen Gezeiteneffekte in den Erdrotationsparametern $\{dUT1, x_p, y_p\}$.

3.1 Gezeiten der festen Erde

Die Gezeiten der festen Erde sind Verformungen der Erdkruste, die bis zu 50 cm betragen können. Tägliche feste Erdgezeiten bewirken kleine retrograde Polbewegungen der Referenzachse (CIP-Achse) mit täglicher Periode. Wegen der in Abschnitt 2.2 erläuterten Frequenzaufteilung des CIP, tauchen diese Bewegungen jedoch nicht in der Polbewegung auf, sondern werden als

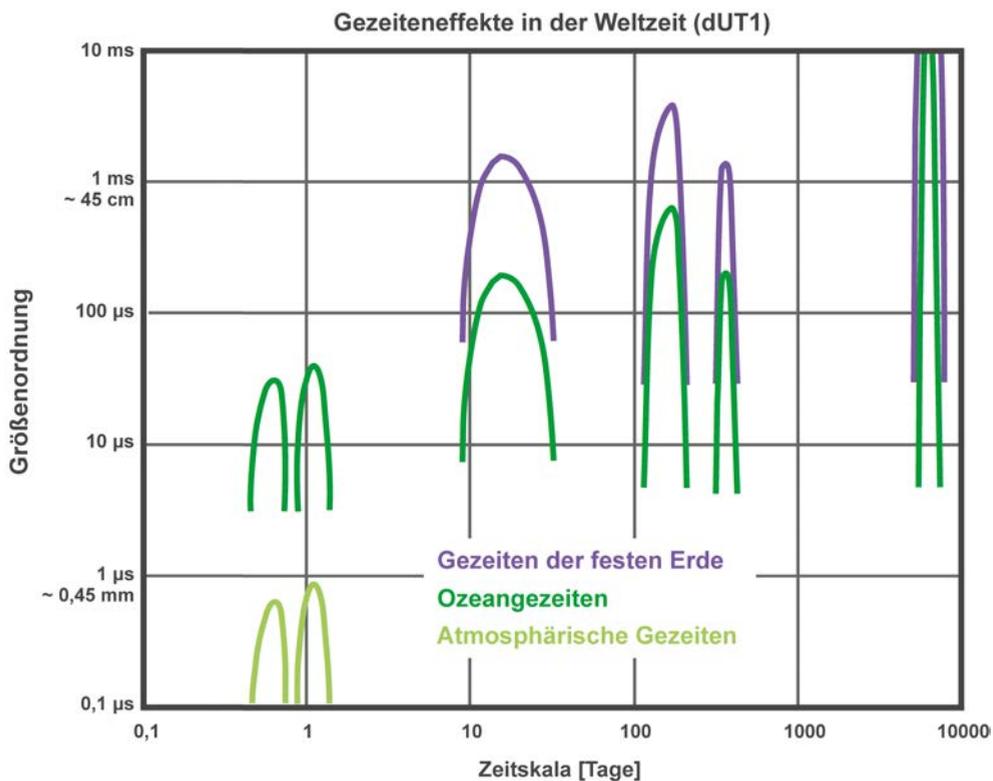


Abb. 3: Größenordnung der Gezeiteneffekte in der Weltzeit

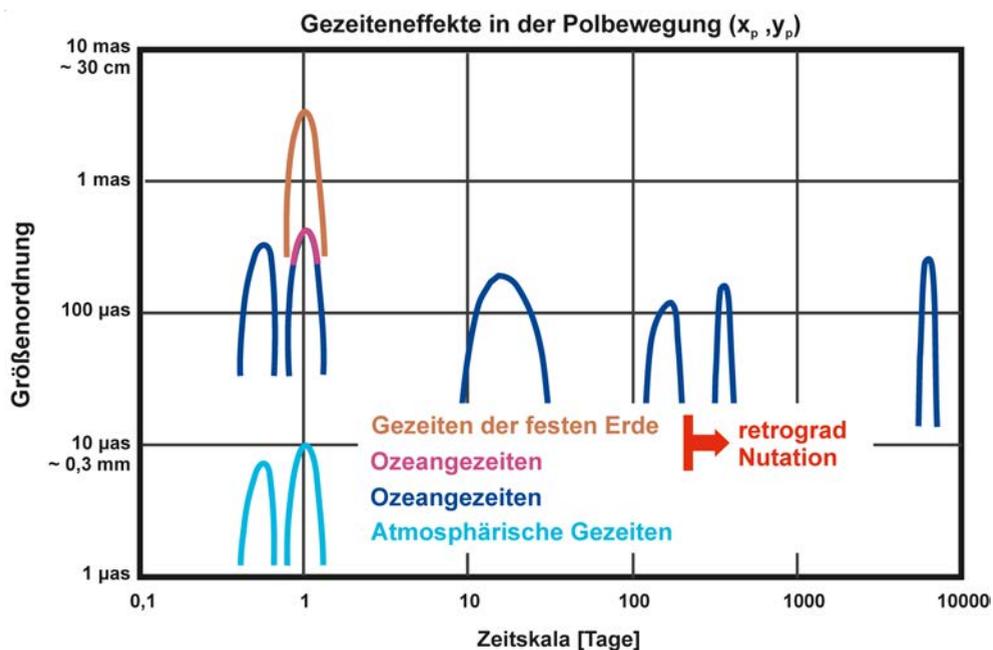


Abb. 4: Größenordnung der Gezeiteneffekte in der Polbewegung

langperiodische zälestische Variationen des CIP im Präzessions-/Nutationsmodell berücksichtigt. Jene Gezeiten, mit Perioden von wenigen Tagen bis zu 18,6 Jahren, sind nur von der Deklination bzw. Breite des gezeitenerzeugenden Körpers abhängig und daher rotationssymmetrisch. Sie haben deshalb keinerlei Auswirkungen auf die Orientierung der Referenzachse, sondern bewirken periodische Veränderungen des polaren Trägheitsmomentes der Erde. Gemäß dem Drehimpulserhaltungssatz hat dies entsprechende Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit und somit der Weltzeit und des Parameters dUT1 zur Folge. Abgesehen von der bereits unter Punkt 3 erwähnten 18,6-Jahres-Periode, weisen jährliche, halbjährliche und vierzehntägige Terme die größten Magnituden auf.

3.2 Ozeangezeiten

Die Reaktion der Ozeane auf Gezeitenkräfte ist, bedingt durch die asymmetrische Verteilung der Kontinente und die Diversität von Ozeanbodentopographie und Küstenlinien, wesentlich komplizierter als jene der festen Erde. Ozeangezeiten jeder Periode, von halbtäglichen bis zu langjährigen, verursachen Variationen in allen Erdrotationsparametern. Halbtägliche und tägliche Meeresgezeiten rufen elliptische Polbewegungen hervor, die in einen prograden und einen retrograden Anteil aufgespalten werden können. Analog zu den Polbewegungsvariationen wegen der täglichen festen Erdgezeiten wird der retrograde Anteil der Schwankungen aufgrund der täglichen Ozeangezeiten der zälestischen Bewegung des CIP zugerechnet. Im Gegensatz zu halbtäglichen und täglichen Gezeiten der festen Erde erzeugen die der Ozeane auch halbtägliche und tägliche Variationen der Rotationsgeschwindigkeit bzw. der Weltzeit. Die langperiodischen Ozeangezeiten haben im Unterschied zu den langperiodischen festen Erdgezeiten keine rotationssymmetrische Ausprägung und erregen aufgrund dessen, neben Änderungen der Weltzeit, auch Polbewegungsvariationen.

3.3 Atmosphärische Gezeiten

Atmosphärische Gezeiten sind nur zu einem geringen Teil gravitativen Ursprunges. Die Hauptursache für die Entstehung atmosphärischer Gezeiten ist die unterschiedliche Aufheizung der Atmosphäre durch die Sonneneinstrahlung (thermische Gezeiten). Der Einfluss dieser täglichen und halbtäglichen Gezeitenwellen auf Polbewegung und Weltzeit ist um etwa eine Größenordnung kleiner, als der Einfluss der ozeanischen

Gezeiten und daher so gut wie nicht beobachtbar (Brzezinski et al. [7]).

4. Beobachtung versus Modellierung

Die Validierung und Weiterentwicklung von Modellen der ERP-Schwankungen ist eine zentrale Aufgabe der Erdrotationsforschung. Das Ziel ist zum einen die Vorhersage der Erdorientierung, um Echtzeitanwendungen und zukünftige Navigationsvorhaben zu optimieren. Zum anderen liefert der Vergleich mit Beobachtungen Erkenntnisse über bestimmte Modellparameter, mit denen z.B. Aussagen über das rheologische Verhalten der Erde getroffen werden können. In der hier beschriebenen Arbeit wurde ein momentan gebräuchliches Modell für Änderungen in der Weltzeit mit beobachteten Schwankungen, die aus VLBI-Messungen abgeleitet wurden, überprüft. Das Untersuchungsobjekt ist das in den letztgültigen IERS Konventionen empfohlene Modell für zonale Gezeiten in dUT1 bzw. LOD. Zunächst sei grob der Begriff der „zonalen“ Gezeiten erklärt: Entwickelt man ein globales Gezeitendeformationsfeld in Kugelflächenfunktionen, so kann man diese Entwicklung in zonale, sektorische und tesserale Terme einteilen. Sektorische Terme sind nur längenabhängig, tesserale sind sowohl längen-, als auch breitenabhängig. Zonale Terme sind wiederum nur breitenabhängig und dadurch rotationssymmetrisch. Diese Verformungsanteile verändern das polare Trägheitsmoment der Erde und bewirken folglich Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit und damit in dUT1. Das Modell für zonale Gezeiten beinhaltet langperiodische Variationen (> 1 Tag) der Weltzeit, die hauptsächlich durch feste Erdgezeiten, aber auch durch ozeanische Gezeiten induziert werden. Im Vergleich mit aus Beobachtungen verschiedener geodätischer Weltraumverfahren kombinierter Serien von Tageslängenschwankungen ergaben sich für dieses Modell relativ große Residuen, vor allem im Bereich der vierzehntägigen Perioden (Gross, [8]). In [8] wurde eine alternative Kombination mehrerer Modelle für elastische und anelastische feste Erdgezeiten und Ozeangezeiten vorgeschlagen. Als weitere unabhängige Evaluierung wurden beide Modelle einer Serie von dUT1-Variationen gegenübergestellt, die aus VLBI-Beobachtungen abgeleitet wurden.

4.1 Beobachtete dUT1-Schwankungen

Wie bereits erwähnt ist der Parameter dUT1 unmittelbar nur mit dem Verfahren VLBI messbar. Die Bestimmung von dUT1 (und der anderen EOP) erfolgt im Zuge der allgemeinen Parame-

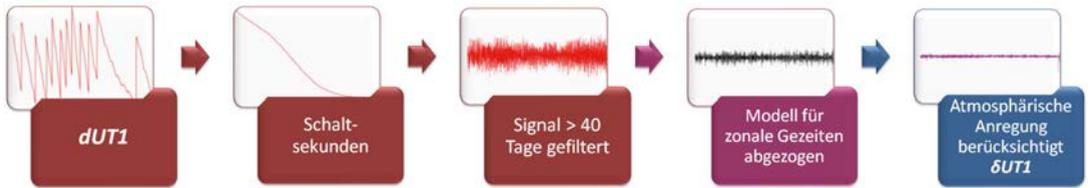


Abb. 5: Ablaufschema der Signalverarbeitung

terschätzung, innerhalb welcher auch diverse andere Größen, wie Stationskoordinaten, Uhrenfehler etc. berechnet werden können. Für die Ableitung der hier herangezogenen dUT1-Serie wurde die VLBI-Software OCCAM 6.1 (Gauss-Markov-Modell) verwendet. Zur Auswertung kamen ausgewählte 24-Stunden-Sessions aus dem Zeitraum 1984-2008. Koordinaten von Stationen und Radioquellen wurden jeweils auf ihre ITRF2005 bzw. ICRF-Extension-2 Positionen fixiert. Da ERP mit subtäglicher Auflösung bestimmt wurden, wurde für die Präzessions-/Nutationsparameter die Summe aus den Modellwerten von IAU2000A und IERS C0405 Celestial Pole Offsets festgehalten, um Korrelationen zu vermeiden. Eine solcherart berechnete dUT1-Serie enthält neben den zu untersuchenden Signalen noch einige andere Komponenten, die vor dem Vergleich reduziert werden müssen. Abbildung 5 zeigt ein Ablaufdiagramm der durchzuführenden Schritte der Signalvorverarbeitung.

Um eine Zeitreihe ohne Sprünge zu bekommen, sind zuerst die so genannten Schaltsekunden wieder anzubringen. Alle Schwingungen mit Perioden über 40 Tagen wurden aus der Serie gefiltert, da die Betrachtung in diesem Fall auf Terme mit Perioden bis zu 35 Tagen beschränkt wurde. Im Vergleich wurden die Residuen zum jeweiligen Modell angesehen, daher wurden die zu testenden Modelle vorher von der Beobachtungsreihe abgezogen. Die Weltzeit unterliegt außerdem nicht-gezeitenbezogenen atmosphärischen Einflüssen, die vorwiegend durch zonale Winde verursachte Schwankungen im gleichen Periodenbereich wie die zonalen Gezeiten hervorrufen. Diese atmosphärische Anregung von dUT1 kann aus so genannten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen (die z.B. das Global Geophysical Fluids Centre des IERS zur Verfügung stellt) berechnet werden. Die verbleibenden dUT1-Variationen wurden als Pseudobeobachtungen in eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate eingeführt, um die Restamplituden zu den zu überprüfenden Modellen zu schätzen. Die Beobachtungsgleichung (2) ist eine Summe aus Einzelschwingungen, für die

jeweils eine Sinus- und eine Kosinusfunktion mit der entsprechenden (bekannten) Frequenz ξ_i angesetzt werden. Die Unbekannten sind die Amplituden A_i und B_i der Sinus- und Kosinusfunktion für jede Gezeitenwelle i .

$$\delta UT1 = \sum_{i=1}^{42} A_i \sin(\xi_i) + B_i \cos(\xi_i) \quad (2)$$

Sowohl das Modell nach IERS Konventionen 2003, als auch das Kombinationsmodell nach [8], bestehen aus 62 Termen mit Perioden von 5,64 Tagen bis zu 18,6 Jahren (die Modelle werden im Weiteren abkürzend mit IERS bzw. KOMB bezeichnet). Zum Vergleich herangezogen wurden lediglich Terme mit Perioden unter 35 Tagen. Demzufolge wurden im Ausgleich nur die Amplituden zu 41 entsprechenden Modelltermen bestimmt. Zur Beurteilung der Aussagekraft der mittleren Fehler der Schätzung wurde zusätzlich eine als Null-Term bezeichnete Komponente angesetzt, zu deren Periode kein gezeitenbezogenes Signal zu erwarten ist.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ausgleichung sind gemäß dem Ansatz als Zuschläge zu den Modellamplituden von IERS und KOMB zu verstehen. In Abbildung 6 sind die aus den beobachteten dUT1-Schwankungen geschätzten Amplitudenresiduen ($\sqrt{A^2 + B^2}$) in Form eines Balkendiagrammes dargestellt. Die Hauptterme (jene mit den größten Modellamplituden) sind farblich hervorgehoben und mit ihrer auf George Darwin zurückgehenden Bezeichnung, sowie ihrer Periode in Tagen versehen. Die orange strich-punktierte Linie kennzeichnet den dreifachen formalen Fehler der Parameterschätzung, der verglichen mit dem Wert des Null-Terms als etwas zu optimistisch eingeschätzt werden kann.

Wesentliche Unterschiede in der Effizienz der beiden Modellkombinationen ergeben sich nur für die vierzehntägigen Terme Mf' und Mf . Hier erweist sich KOMB als deutlich besser geeignet, als das konventionelle Modell IERS, um beobachtete dUT1-Variationen zu reduzieren. Bei Anwendung des IERS Modells auf die Beobach-

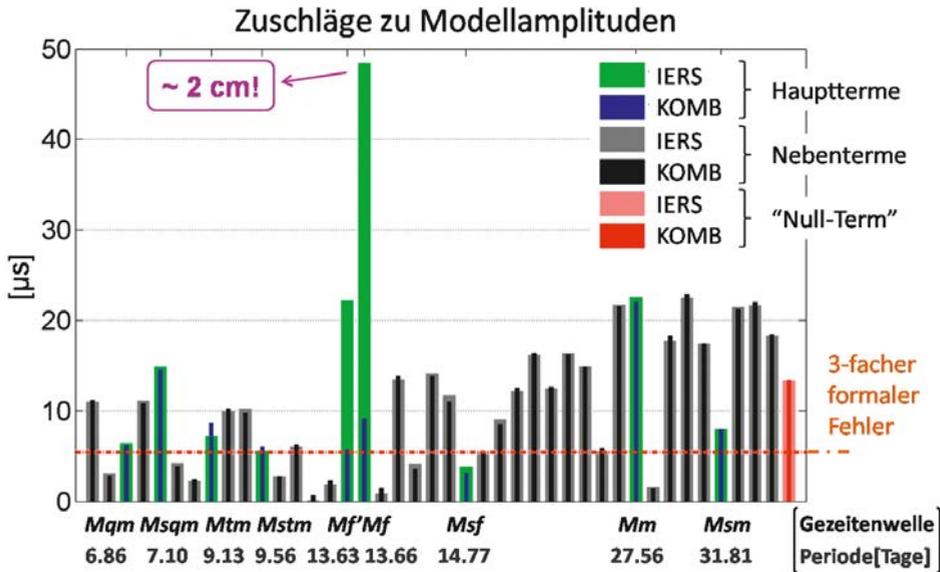


Abb. 6: Aus Beobachtungen geschätzte Zuschläge zu Modellamplituden

tungen verbleibt im vierzehntägigen Periodenbereich eine Restamplitude von bis zu knapp $50 \mu\text{s}$, was mehr als 2 cm am Äquator entspricht. In Anbetracht der Größe des Null-Terms von ca. $12 \mu\text{s}$ und eines dreifachen formalen Fehlers von ca. $5 \mu\text{s}$ ist diese Abweichung jedenfalls als signifikant einzustufen. Diese Studie bestätigt die Resultate aus [8] bezüglich der Insuffizienz des konventionellen Modells für die Effekte der zonalen Gezeiten auf dUT1, die im Besonderen die vierzehntägigen Terme betrifft. Im Rahmen der Untersuchung konnte auch gezeigt werden, dass die Kosinus-Amplitude, der so genannte „out-of-phase part“, den Hauptanteil des Residuums ausmacht. Dieser Term beschreibt eine verzögerte Reaktion des Körpers auf die Gezeitenkräfte und enthält zu einem kleinen Teil anelastische Effekte und zum größten Teil Effekte der ozeanischen Gezeiten. Ein großes Residuum im Kosinus-Term lässt also darauf schließen, dass die Effekte der Meeresgezeiten in IERS unzureichend modelliert sind. Der Modellvorschlag KOMB verwendet ein alternatives Modell für den Effekt der langperiodischen Ozeangezeiten (Kantha und Stewart [9]), welches offensichtlich besser geeignet ist, um tatsächlich beobachtete Einflüsse im vierzehntägigen Periodenbereich zu berücksichtigen. Die hier getestete Modellkombination wird als neues Modell für die Effekte der zonalen Gezeiten auf dUT1 bzw. LOD in die nächste Version der IERS Konventionen aufgenommen werden.

Referenzen

- [1] <http://www.iers.org>
- [2] The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry (2009), Presented on behalf of the IERS / IVS Working Group, Alan Fey, David Gordon, and Christopher S. Jacobs (eds.). (IERS Technical Note ; 35) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- [3] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php
- [4] IERS Conventions 2003 (2004). Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. (IERS Technical Note; 32). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- [5] IAU-Resolutions 2000, http://syre.obspm.fr/IAU_resolutions/Resol-UA1.htm
- [6] <http://tai.bipm.org/iers/convupdt/convupdt.html>
- [7] Brzezinski A., Bizouard Ch. and Petrov S.D. (2002): Influence of the Atmosphere on Earth Rotation: what new can be learned from recent atmospheric angular momentum estimates? *Surveys in Geophysics*, 23, pp. 33-69.
- [8] Gross R. S. (2009): Ocean tidal effects on Earth rotation, *Journal of Geodynamics*, Vol. 48, Issues 3-5, pp. 219-225.
- [9] Kantha L.H. and Stewart J.S. (1998): Long-period lunar fortnightly and monthly ocean tides. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, NO. C6, pp. 12639-12647.

Anschrift der Autorin

Dipl.-Ing. Sigrid Böhm, Forschungsgruppe Höhere Geodäsie, Institut für Geodäsie und Geophysik E128/1, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien.
E-Mail: sigrid.boehm@tuwien.ac.at