



Die Rotation der Erde

Paulo Jorge Mendes Cerveira, Leopoldsdorf

Kurzfassung

Es wird ein kurzer geschichtlicher Überblick über die Erdrotation gegeben, wobei auch rezenter Ergebnisse präsentiert werden. Weltzeit- oder Tageslängenschwankungen sind recht einfach zu verstehen (bis auf die Effekte des Erdinneren). Aber, eine Herausforderung für jeden Geodäten stellt der Unterschied zwischen Präzession-Nutation und Polbewegung dar.

Schlüsselwörter: Erdrotation, Präzession, Nutation, Polbewegung, Tageslänge

Abstract

The author gives a short historical review on Earth rotation, including recent results on that topic. Variations of universal time or length of day can be easily understood, except those arising from the interior of the Earth. However, a much more complicated issue lays in the difference between precession-nutation and polar motion, which causes a severe headache.

Keywords: Earth's Rotation, Precession, Nutation, Polar Motion, Length of Day

1. Einleitung

Es gibt Fragen, die stellen sich ganz einfach, aber sind wahrlich schwer zu beantworten. Ein physikalisches System hat keinen Willen, es unterliegt nur Naturgesetzen. Naturgesetze sind immer wirksam. Naturgesetze kann man nicht umgehen. Sie kennen kein „In dubio pro reo“. Deshalb können sich Körper im Kosmos gegen Störungen nicht wehren. Kurz gesagt, es geht in diesem Beitrag um die Frage: Wie rotiert die Erde?

Vorher sollte noch folgende Frage beantwortet werden: Warum rotiert die Erde? Wir wissen es nicht genau, aber folgende Erklärung ist ausreichend. Der Beginn einer Drehung ist eine Nichtdrehung! Im Universum ist am Anfang meistens Gas, eine Gaswolke. Diese ist nicht homogen verteilt, es sind verschiedene Dichten vorhanden. Es wird „geschubst“ und „gedrückt“. Das „Anschubsen“ geschieht nie symmetrisch. Symmetrisch würde bedeuten, dass die Wolke exakt im Schwerpunkt getroffen wird. Der Drehimpuls eines Systems ist was ganz Besonderes, es ist eine Erhaltungsgröße! Wenn die Gaswolke immer dichter wird, dann wird immer mehr „geschubst“. Der Gesamtdrehimpuls bleibt immer konstant. Der Ursprung einer Drehung ist also das asymmetrische „Schubsen“. Damit diese Gaswolke zum Stern wird muss dieser Drehimpuls verteilt werden. Aber wie? Wenn es dicht wird so reibt sich das Gas, gibt ständig Reibungsenergie ab. Innen dreht es sich anders, es verliert also Energie. Der Drehimpuls wird nach außen transportiert. Der innere Teil verliert einen

Teil des Drehimpulses und kann nun vollständig in sich zusammenfallen. Wenn Sterne sich zu schnell drehen würden, würden sie auseinander fliegen. Dieser Drehimpuls, der wegtransportiert wird, ist verantwortlich dafür, dass um einen Stern herum Planeten entstehen können, die mit der entsprechenden Energie herumkreisen können und dazu noch einen Eigendrehimpuls besitzen. Deswegen drehen sich Planeten, weil die ursprüngliche Gaswolke den Drehimpuls an ihrer Umgebung abgegeben hat. Die Sonne hat eine sehr niedrige Drehgeschwindigkeit! Aber es ist ihr gelungen 99% des Drehimpuls, den sie einmal hatte, an die Planeten zu geben. Der Eigendrehimpuls der Planeten ist sehr wichtig. Würde sich der Planet nicht drehen, dann würde er dem Stern immer die gleiche Seite zuwenden. Eine Seite würde immer geheizt werden, die andere Seite bliebe immer im Dunkeln. Dass sich Himmelskörper drehen hat damit zu tun, dass Nichts wirklich in diesem Universum symmetrisch ist. Planeten drehen sich in einer Ebene. Aber wir wissen, dass sie viele Einschläge abbekommen haben. Daraus entsteht die Rotation der Planeten und somit die Rotation der Erde. Wir werden jetzt die Erdrotation näher betrachten. Ziel aller Bemühungen die Rotation der Erde zu verstehen besteht darin, diese komplett vorherzusagen (aus anderen geophysikalischen und astronomischen Beobachtungen).

Karl Rinner (Abb. 1) gilt in Österreich als Universalgeodät. Dieser kurze Beitrag ist im Zuge der Karl-Rinner Preisverleihung entstanden.



Abb. 1: Karl Rinner

2. Die Stellung der Erdachse im Raum

2.1 Griechische Augen

Die Erdorientierung wird üblicherweise dargestellt über eine Transformationsmatrix, die einen erdfesten Vektor in einen raumfesten überführt [2]. Diese Matrix wird heute zusammengesetzt aus der Polbewegungs-, Erdrehungs-, und Präzession-Nutationsmatrix.

Die Erdrotation ist bereits den aufmerksamen griechischen Augen bekannt gewesen. Aristarch von Samos (3. Jh. v.Chr) hat die ersten Vermutungen geäußert, dass sich die Erde um ihre Achse dreht. Leider wurde dies von Ptolemäus als unsinnig zurückgewiesen. Die Rotationsdauer der Erde beträgt in etwa 23 Stunden und 56 Minuten.

2.2 Präzession der Erdachse

Hipparch von Nikäa (130 v.Chr) ist die Entdeckung der Veränderung der Rotationsachse im Raum, d.h. die Präzession zu verdanken. Die Präzession ist eine rückläufige Bewegung des Frühlingspunktes mit ca. 50 Bogensekunden pro Jahr. Dies bedeutet in etwa ein Umlauf in ca. 26000 Jahren. Dies ist natürlich eine Extrapolation, die nie über so einen langen Zeitraum beobachtet wurde. Die Theorie des Kreisels, angewandt auf die Erde, erlaubt uns jedoch, unter etlichen Annahmen, Rückschlüsse auf diese Pe-

riode zu machen. Dabei umläuft der mittlere Pol des Äquators den mittleren Pol der Ekliptik (beide Ebenen sind in etwa um 23.5 Grad geneigt). Projiziert auf die Erdoberfläche macht dies in etwa 600 m pro Jahr aus (siehe Abb. 2).

Präzession der Erdachse

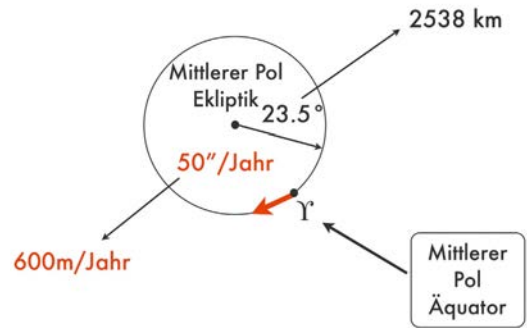


Abb. 2: Präzession der Erdachse

2.3 Entdeckung der Nutation

Im Jahre 1748 veröffentlichte James Bradley einen Beitrag in dem der Begriff der astronomischen Nutation auftaucht. Diese Art von Nutation hat exakt die gleiche physikalische Ursache wie die astronomische Präzession. Die astronomische Nutation führt periodische Bewegungen durch, wobei die Amplituden der 18.6-jährigen Periode (in Schiefe und Ekliptik), projiziert auf die Erdoberfläche einer Nutationsellipse, in etwa 276 m und 83 m ausmachen (siehe Abb. 3).

Jean le Rond d'Alembert gelang es im Jahre 1749 mithilfe des Newtonschen Gravitationsgesetzes die Präzession und Nutation zu erklären. Dies führte zu einem Streit der Extraklasse zwischen d'Alembert und Leonard Euler. Euler behauptete, dass d'Alembert ihm diese Idee gestohlen habe!

Astronomische Nutation der Erdachse

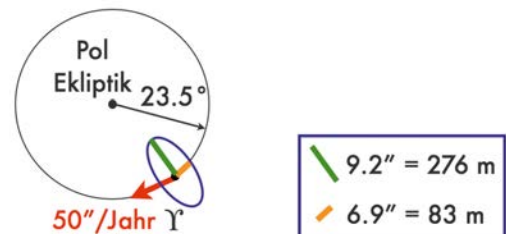


Abb. 3: Astronomische Nutation

3. Polbewegung

Ein paar Jahre später (um 1758) postulierte Euler, dass sich die Erdachse auch gegenüber dem erdfesten System bewegen müsse. Aus den heute bekannten Trägheitsmomenten der Erde errechnet sich die Eulerperiode zu ca. 305 Tagen (siehe Abb. 4). Diese Bewegung ist eine Eigenschwingung der drehmomentenfreien Bewegung der Erde (d.h. die Summe der Drehmomente der Erde ist Null). Dies wird mathematisch mit den Eulerschen Gleichungen ausgedrückt. Zur Zeit Eulers konnte diese Eigenschwingung noch nicht beobachtet werden, da sie viel zu klein ist (ein paar Meter).

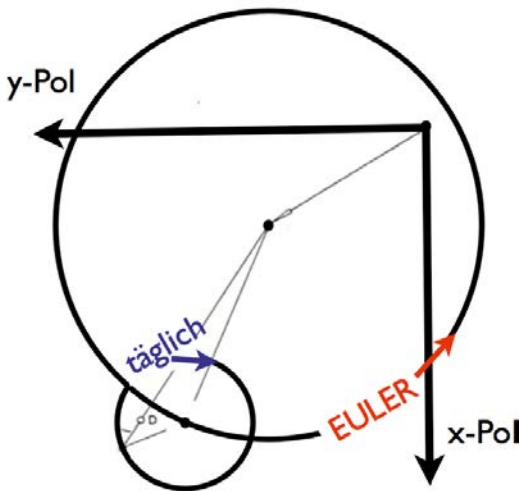


Abb. 4: Prograde Eulerbewegung und retrograde tägliche Polbewegung

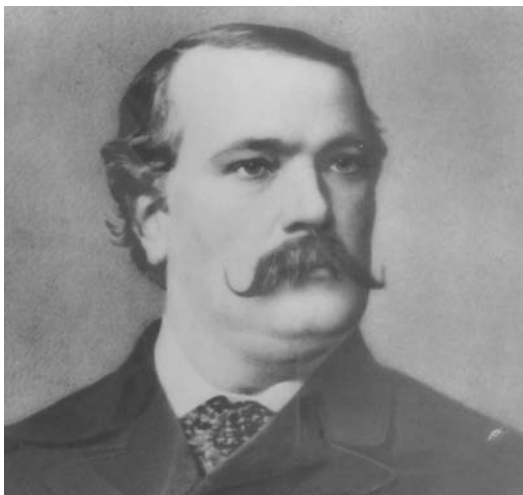


Abb. 5: Theodor Ritter von Oppolzer

Im Jahre 1844 schrieb Friedrich Wilhelm Bessel an A.v.Humboldt: „Ich habe Verdacht gegen die Unveränderlichkeit der Polhöhe... Ich denke dabei an innere Veränderungen des Erdkörpers, welche Einflüsse auf die Richtung der Schwere erlangen.“

Im Jahre 1880 entwickelt T. von Oppolzer (siehe Abb. 5) die Theorie der erzwungenen Nutationen der Erde. Für eine starre rotationssymmetrische Erde gibt Oppolzer drei Amplituden an. Zu diesem Zeitpunkt waren diese Amplituden viel zu klein (ca. 60 cm an der Erdoberfläche im retrograden täglichen Spektrum) um beobachtbar zu sein. Diese erzwungenen Nutationen (siehe Abb. 6) können aus der Theorie der Präzession und Nutation berechnet werden.

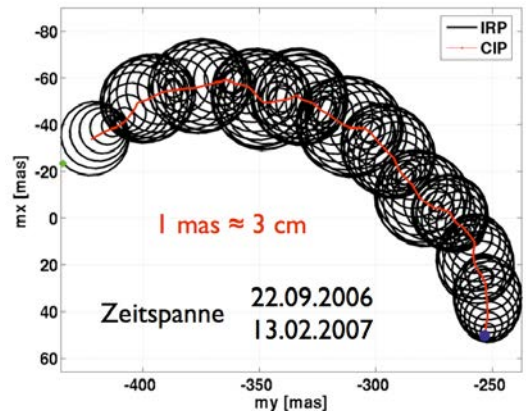


Abb. 6: Prograde und retrograde Polbewegung

Der Nachweis der Polschwankung gelang 1887 durch Karl Friedrich Küstner. Im Jahre 1891 publizierte Seth Carlo Chandler einen Beitrag, in dem er die Polschwankung mit einer Periode von 427 Tagen angibt (2 Monate länger als von Euler postuliert). Die Antriebsmechanismen des Chandler Wobbles sind bis heute noch nicht restlos geklärt.

Heutzutage wird die Polbewegung (siehe Abb. 7) hauptsächlich aus GPS-Beobachtungen abgeleitet. Man erkennt sehr gut eine Drift sowie eine Schwebung. Wenn die Schwebung minimal wird kann man sehr schön den Einfluss der geophysikalischen atmosphärischen Störungen auf die Polbewegung erkennen (siehe Abb. 8).

Moderne Weltraumverfahren, allen voran das GPS, erlauben es die Stellung der Erdachse auf ein paar mm zu bestimmen. Die Erdrotationsparameter enthalten den integralen Effekt aller Massenverlagerungen und Strömungen (wie z.B. der

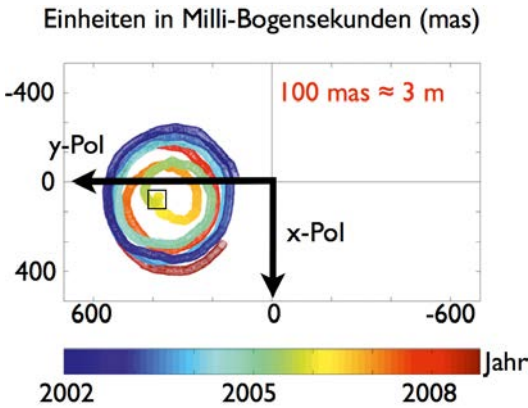


Abb. 7: Polbewegung (Abtastezeit ist 1 Tag) zwischen 2002 und Ende November 2008

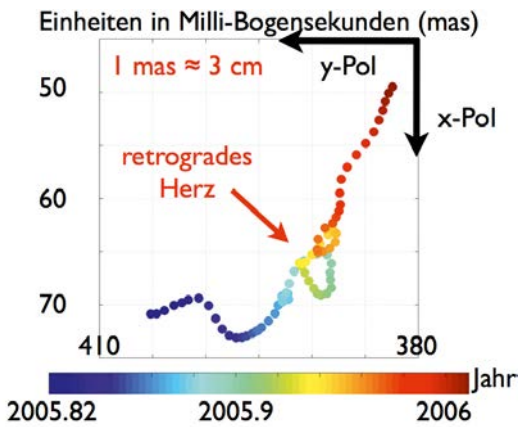


Abb. 8: Einfluss der atmosphärischen Störung auf die Polbewegung

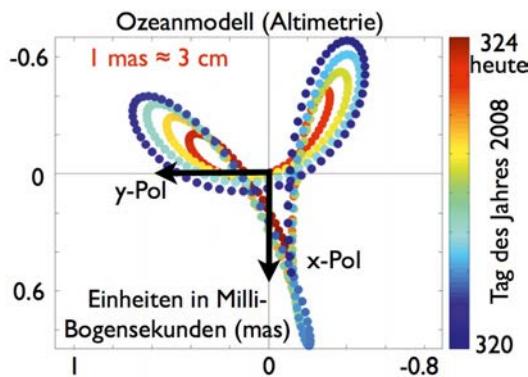


Abb. 9: Subtägliche Polbewegung aufgrund des Einflusses der Ozeanverteilung

Einfluss der Ozeanverteilung im subtäglichen Bereich in Abb. 9), die die Euler-Liouville-Gleichungen (Summe aller Drehmomente im System ist Null) beschreiben [3]. Eine Randbedingung

wird heute noch nicht berücksichtigt: die Energieerhaltung (und indirekt die Massenerhaltung des Systems Erde, bis auf ein paar Meteoriten, die auf die Erde einschlagen)!

4. Weltzeit und Tageslänge

Die Drehrate der Erde um ihre Rotationsachse ist nicht konstant. Die Tageslänge variiert. Reibungsverluste durch die Meeresgezeiten machen in etwa 2 ms/Jht. aus. Der Mond entfernt sich von der Erde mit einer Rate von ca. 3 cm/Jahr. Die Sonnenfinsternisse haben uns den besten Beweis für die säkulare Tageslängenvariation geliefert.

Heute sind die Effekte der Gezeiten auf die Tageslängenvariation eindeutig erkennbar (siehe Abb. 10). Geophysikalische Anregungen der Tageslänge stimmen mit den geodätischen sehr gut überein. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0.98 (siehe Abb. 11).

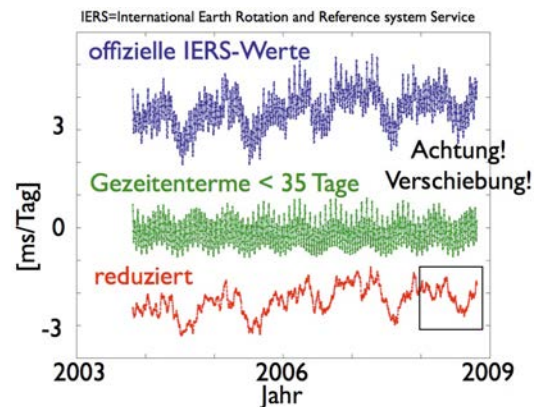


Abb. 10: Einfluss der festen Erdgezeiten (5 bis 35 Tage) auf die Tageslänge

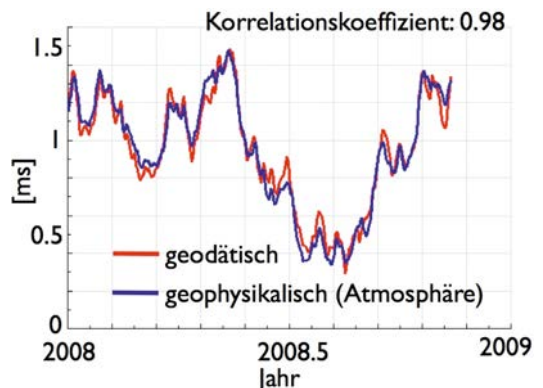


Abb. 11: Korrelation zwischen geodätischer und geophysikalischer Anregung (über so genannte Drehimpulsfunktionen)

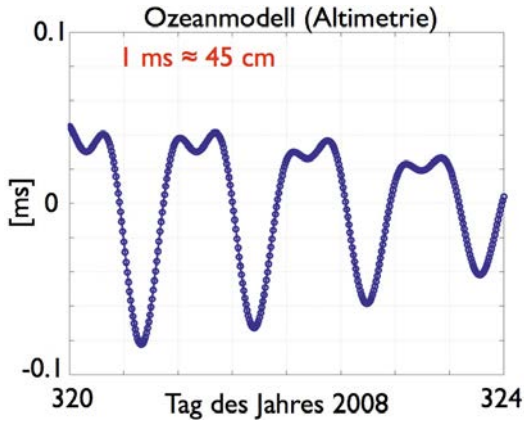


Abb. 12: Einfluss des Ozeans auf die Weltzeit (subtägliches Spektrum)

Genauso wie bei der Atmosphäre lassen sich die lang- und kurzperiodischen Effekte der Ozeane auf die Polbewegung und Weltzeit berechnen und schätzen. Hier liefert die Satellitenaltimetrie über die Ozeane den größten Input (siehe Abb. 12).

Mathematisch wird die Erdrotation oft über die Figuren-, Drehimpuls-, oder Rotationsachse beschrieben. In den letzten Jahrzehnten hat sich allerdings herausgestellt, dass man die Präzession und Nutation am besten für einen fiktiven Pol (früher CEP, heute CIP) vorhersagen kann [5].

Leider wird die Erdrotation heute nicht aus dem Baukastenprinzip zusammengesetzt, sondern es wird alles vermischt (astronomisch und geophysikalisch). Heute bestimmt nur noch die Frequenz, ob es sich um eine Präzession-Nutation- oder Polbewegung handelt. Dieser Zustand macht es heutigen und künftigen Generationen extrem schwer, die Erdrotation zu verstehen. Bestehende Modelle sind oft undurchschaubar, unübersichtlich sowie schlecht dokumentiert und führen oft zu Fehlern (wie z.B. Doppelführung von Effekten).

5. Lokale Rotationsensoren, Großringlaser G

Heute reagieren lokale Rotationssensoren extrem sensitiv auf die Bewegung des instantanen Rotationpols (IRP). Mathematische Transformationen erlauben jedoch die Bewegung des zälestischen Zwischenpols (CIP) in die Bewegung des IRP zu überführen [6] (siehe Abb. 13). Allerdings sind in diesem Fall numerische Differenzenbildungen notwendig, die den Rauschpegel erhöhen.

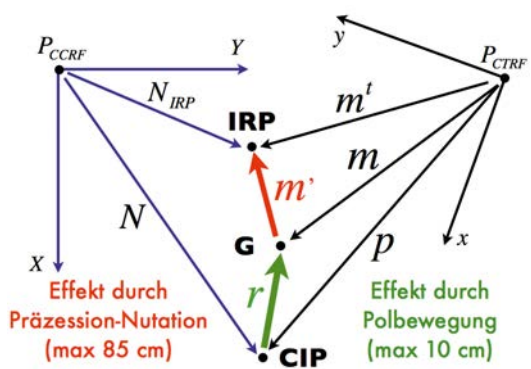


Abb. 13: Synthese zwischen Präzession-Nutation und Polbewegung

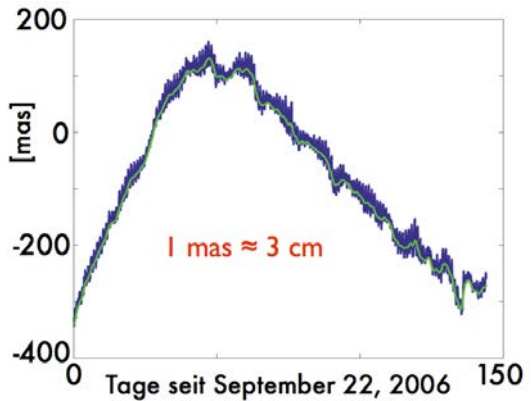


Abb. 14: Relative Sagnacfrequenz (langperiodischer Trend abgezogen)

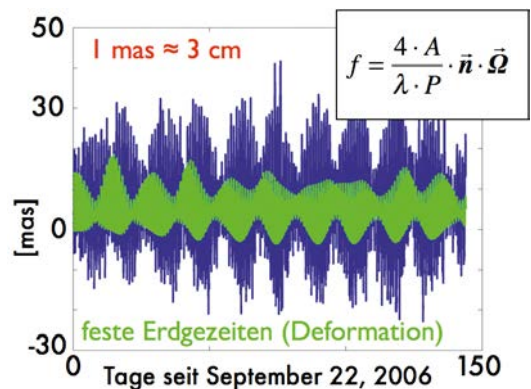


Abb. 15: Relative Sagnacfrequenz (langperiodische Anteile sowie Einfluss der festen Erdzeiten auf die Polbewegung wurden reduziert)

Die Messgröße des Großringlasers „G“ ist die relative Sagnacfrequenz [7, 8, 9] (siehe Abb. 14). Letztere ist abhängig von der orientierten effektiven Ringlaserfläche „n mal A“, Winkelgeschwin-

digkeit „Omega“, Wellenlänge „Lambda“ des Laserlichts sowie der Weglänge „P“ des Laserstrahls (siehe Formel in Abb. 15).

Heute erkennt man aus der relativen Sagnacfrequenz, den Effekt der festen Erdzeiten [4] (siehe Abb. 15), sowie die Oppolzerterme [1] (retrograde tägliche Terme in Abb. 16 und 17).

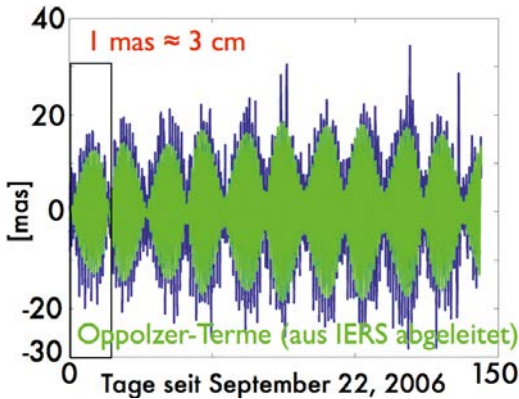


Abb. 16: Relative Sagnacfrequenz (Oppolzerterme, gemessen und modelliert)

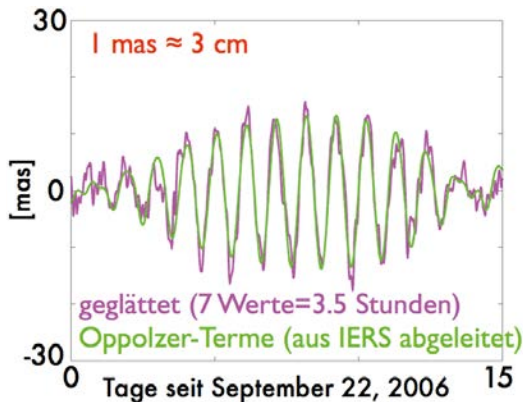


Abb. 17: Relative Sagnacfrequenz (Oppolzerterme, gefiltert und modelliert)

Im täglichen Bereich sind noch Restamplituden im Bereich von 1 Millibogensekunde unerklärt (siehe Skalogramm in Abb. 18). Das Rauschen des Messsignals liegt in etwa bei 0.5 mas (siehe Abb. 19).

Der Großringlaser G ist im Augenblick nicht für längere Perioden geeignet, wegen der hohen instrumentellen Drift. Der Effekt der zonalen Gezeiten auf die Tageslänge ist derzeit nicht erkennbar.

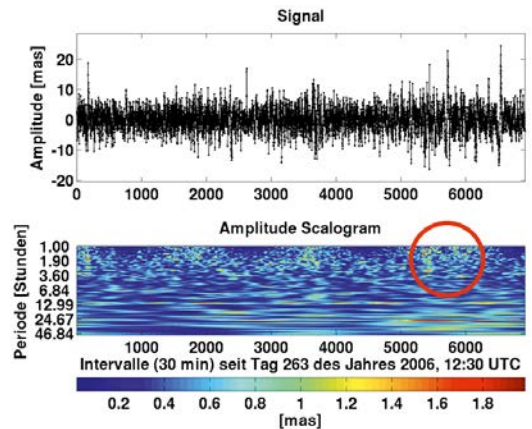


Abb. 18: Skalogramm der Residuen in der relativen Sagnacfrequenz

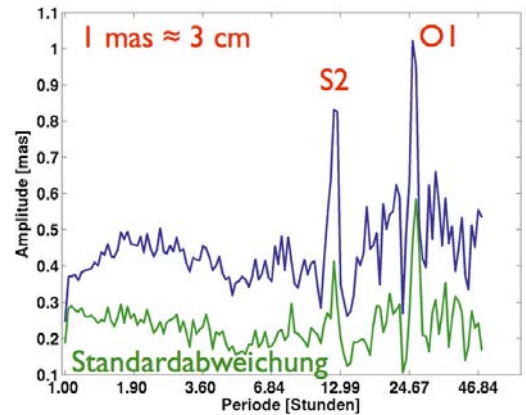


Abb. 19: Amplitudenspektrum der Residuen in der relativen Sagnacfrequenz

6. Schlussfolgerung

Die Stärken der individuellen Techniken (astronomisch, geodätisch, und geophysikalisch) müssen ausgenutzt werden, denn eine genauere Interpretation der Ergebnisse erfordert eine Steigerung der Konsistenz aller Techniken. Die Kenntnis des Unterschiedes zwischen den technik-spezifischen, systematischen Fehlern und den geophysikalischen Signalen ist notwendig. Die Beobachtungsverfahren werden immer aufwendiger und genauer, und daher wird unser Wissen über die Phänomene der Erdrotation immer größer. Mit großen Laserkreisläufen lassen sich die Oppolzerterme direkt bestimmen.

Danksagung

Ich bedanke mich bei der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) für die Finanzierung dieser Arbeit innerhalb der Forschergruppe FOR584 „Earth Rotation and Global Dynamic Processes“. Besonderen Dank gilt Prof. Harald

Schuh, den ich auf vielen Dienstreisen in der ganzen Welt begleiten durfte, der mich den wichtigsten Persönlichkeiten auf dem Gebiet der Erdrotation vorgestellt hat, und vor allem für seine stetige Motivation, ohne die ich nie meinen Dokortitel erreicht hätte.

Literaturverzeichnis

- [1] *Brzezinski A.*: Contribution to the theory of polar motion for an elastic earth with liquid core, *manuscripta geodaetica*, Vol. 11, pp. 226-241 (1986)
- [2] *Brzezinski A. and N. Capitaine*: The use of the precise observations of the Celestial Ephemeris Pole in the analysis of geophysical excitation of Earth rotation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 98 (B4), pp. 6667-6675 (1993)
- [3] *Gross R.S.*: Earth Rotation Variations – Long Period, in *Physical geodesy*, T.A. Herring (ed.), pp. 239-294, *Treatise on Geophysics*, Vol. 3, Elsevier, Oxford (2007)
- [4] *Mathews P.M., V. Dehant and J.M. Gipson*: Tidal station displacements, *J. Geophys. Res.*, Vol. 102 (B9), pp. 20469-20477 (1997)
- [5] *Mathews P.M., T.A. Herring and B.A. Buffet*: Modeling of nutation and precession: new nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior, *J. Geophys. Res.*, Vol. 107 (B4), doi: 10.1029/2001JB000390 (2002)
- [6] *Mendes Cerveira P.J., J. Boehm, H. Schuh, T. Klügel, A. Velikoseltsev, K.U. Schreiber and A. Brzezinski*: Earth Rotation Observed by Very Long Baseline Interferometry and Ring Laser, *Pure appl. Geophys.* 166, doi: 10.1007/s00024-004-0487-z (2009)
- [7] *Schreiber K.U., T. Klügel and G.E. Stedman*: Earth tide and tilt detection by a ring laser gyroscope, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108 (B2), doi: 10.1029/2001JB000569 (2003)
- [8] *Schreiber K.U., A. Velikoseltsev, M. Rothacher, T. Klügel and G.E. Stedman*: Direct measurement of diurnal polar motion by ring laser gyroscopes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109 (B06405), doi: 10.1029/2003JB002803 (2004)
- [9] *Schreiber K.U., T. Klügel, A. Velikoseltsev, W. Schlüter and G.E. Stedman*: The Large ring laser G for Continuous Earth Rotation Monitoring, submitted to *Pure and Applied Geophysics* (2008)

Anschrift des Autors

DI Dr. techn. Mendes Cerveira Paulo Jorge, Platanengasse 18, A-2333 Leopoldsdorf.

E- mail: paulo.mendes@geoservice.at

vgi