



Das neue Nutationsmodell

Robert Weber, Harald Schuh,
Sigrid English, Kristyna Snajdrova, Wien

Kurzfassung

Ende des Jahres 2003 wurde einem internationalen Forscherteam unter Leitung von Prof. Veronique Dehant (Royal Observatory Belgien) für Arbeiten zum Thema ‚Non-rigid Earth Nutation Model‘ der Europäische Descartes Preis verliehen. Diese Arbeiten hatten zum Ziel, das seit 1980 gültige Nutationsmodell auf Basis neuester theoretischer Studien und dem heute zur Verfügung stehenden Messmaterial um mindestens einen Faktor 10 zu verfeinern. Dieser Artikel soll einerseits die Vorgangsweise der Arbeitsgruppe als auch die erarbeiteten Modellverbesserungen näher beleuchten und nicht zuletzt den Nutzen einer möglichst präzisen Beschreibung der Orientierung der Erde im Raum aufzeigen. Er soll gleichzeitig zeigen, dass die Entwicklung eines neuen Nutationsmodells nicht eine rein astrogeodätische Aufgabe ist, sondern die Beschäftigung mit dem gesamten System Erde erfordert.

Abstract

End of 2003 the European Union awarded the Descartes Prize for excellent collaborative research to an international group of scientists chaired by Prof. Veronique Dehant (Royal Observatory Belgium) for the development of a new ‚Non-rigid Earth Nutation Model‘. Goal of that work was the thorough revision of the old nutation model IAU1980 (already in use for more than two decades) based on state of the art theoretical studies and on the best currently available observation data. The anticipated goal was the refinement of the previous model by a factor of 10 but finally the new model outperforms the old one by a factor of 100. This article discusses step by step the activities of the working group and takes a closer look at the acquired model improvements. Also the general benefits of an accurate prediction of Earth's orientation in space are briefly discussed. Last but not least, it has to be mentioned that the development of a new nutation theory is not a sole astro-geodetic task but needs consideration of the whole system Earth.

1. Grundlagen

Bevor wir uns in die Thematik vertiefen, wollen wir zuerst einige Grundlagen rekapitulieren. Die Polachse der Erde ist bekanntlich gegen die Normale auf die Erdbahnebene um einen Winkel von rund 23.5 Grad (Schiefe der Ekliptik) geneigt. Diese Tatsache führt z.B. zur Abfolge der Jahreszeiten. Ohne den Einfluss äußerer Kräfte wäre die Polachse nun raumfest, d.h. sie würde immer an den gleichen Punkt der Himmelskugel zeigen. Die Anziehungskräfte von Sonne und Mond versuchen jedoch die Äquatorebene der Erde in die Erdbahnebene zu kippen, also vereinfacht gesprochen die Erdachse aufzurichten. Die Erde verhält sich infolge ihrer Rotation um die Polachse in 24 Stunden Sternzeit (oder 23h 56m 04s Weltzeit) physikalisch gesehen wie ein Kreisler. Somit weicht die Polachse normal zum angreifenden Drehmoment aus und beschreibt in rund 26000 Jahren einen Konus mit der Spitze im Geozentrum und einem Öffnungswinkel von rund 23.5 Grad. Diese Bewegung nennen wir Präzession (siehe Abb.1). Wir vermerken, dass Präzession erstens ein zyklischer Vorgang ist, nur eben mit einer sehr langen Periode, und zweitens, dass die Präzession sowohl vom Mond als auch von der Sonne verursacht wird. Betrachten wir die

Elliptizität der Erd- als auch der Mondbahn, die sich dadurch ändernden Abstände der Erde zu Sonne und Mond oder auch nur die Neigung der Mondbahn gegen die Ekliptik, so wird sofort klar, dass die Präzessionsbewegung von einer Vielzahl weiterer zyklischer Bewegungen, allerdings mit kleinerer Amplitude, überlagert wird. Diese zusätzlichen Terme werden unter dem Begriff Nutation zusammengefasst. Der größte Nutations-term mit einer Amplitude von ca. 17" (Bogensekunden) stammt übrigens von der rückläufigen Mondknotendrehung und hat damit eine Periode von rund 18.6 Jahren. Die Perioden der lunisolen Nutationsterme lassen sich im Prinzip aus einer Linearkombination von 5 Argumenten (mittlere Anomalie der Sonne und des Mondes, mittlere Länge des aufsteigenden Mondknotens, mittlere Elongation des Mondes von der Sonne und dem Argument der Breite des Mondes) errechnen. Sie können zwischen 2 Tagen und vielen Jahren variieren. Nicht nur Sonne und Mond sondern auch die verbleibenden Planeten unseres Systems (vor allem der massereiche Jupiter oder die nahestehenden Planeten Mars und Venus) üben Drehmomente auf den Erdkörper aus. Die Perioden der planetaren Terme ergeben sich als Linearkombinationen der Umlaufzeiten

wesentlichen ITRF-Stationen (*Primary Sites*) und gibt Auskunft, wie viele der angesprochenen Raumtechniken pro Station zur Anwendung kommen (*Collocated Techniques*). Die Genauigkeit der Positionen liegt bei ca. 2mm in Lage und 4mm in Höhe, die Geschwindigkeiten werden als 1mm/Jahr genau angenommen. An einer Revision des ITRF wird derzeit gearbeitet; mit der Veröffentlichung dieses ITRF2005-Katalogs ist Ende des Jahres 2006 zu rechnen.

Die z-Achse des erdfesten Referenzsystems weist in Richtung der Lage des mittleren Rotationspoles der Erde der Jahre 1900-1905. Richtungsänderungen des aktuellen Rotationsvektors der Erde in Bezug auf das erdfeste Referenzsystem bezeichnen wir als Polbewegung. Diese zeigt projiziert auf eine im Pol an den Erdkörper angelegte Tangentialebene kreisähnliche Bewegungen mit Radien von bis zu 15m und mit Hauptperioden von einem Jahr und 1.18 Jahren (Chandler Periode), sowie einen langfristigen Drift nach Westen.

Das raumfeste Koordinatensystem ICRS (*International Celestial Reference System*) wird durch die Richtungen zu rund 200 weit entfernten und damit scheinbar raumfesten aber auch über die Jahre stabilen Radioquellen realisiert (ICRF, siehe Abb. 3). Die Richtungsmessungen stammen ausschließlich von dem in den 80-er Jahren auf gekommenen Verfahren der VLBI.

Dabei werden die Radioquellen mittels eines Netzes von großflächigen Teleskopen beobachtet. Die Auswertung der Basislinien zwischen diesen Teleskopen liefert einerseits die Koordinaten der Stationen, aber auch die Nutation mit einer Genauigkeit von rund 0.1 Millibogensekunden (mas).

Im Prinzip ist die Transformation zwischen 2 kartesischen Systemen durch 3 Drehwinkel bestimmt. Im betrachteten Fall behilft man sich aber mit zumindest 5 (und damit korrelierten) Argumenten (Erdorientierungsparameter (EOP)):

- **Präzession und Nutation** beschreiben die Lage eines fiktiven Pols (CEP=Celestial Ephemeris Pole) im raumfesten System (Matrix $Q(t) = P(t)N(t)$).
- die wahre **Sternzeit**, beschreibt die Rotation der Erde um den CEP (Matrix $R(t)$). Die Geschwindigkeit der Erdrotation nimmt ab und variiert außerdem periodisch. Dies wird durch die Differenz zwischen UT1 und der gleichförmigen Atomzeit ausgedrückt. Aus UT1 kann direkt die mittlere Sternzeit berechnet werden, durch Addition von hochfrequenten Nutationsgliedern auch die wahre Sternzeit. Aus der zeitlichen Ableitung von UT1 erhält man die Tageslänge LOD.
- die **Polbewegungskomponenten** x_P und y_P liefern die Position des CEP im erdfesten System (Matrix $W(t)$).

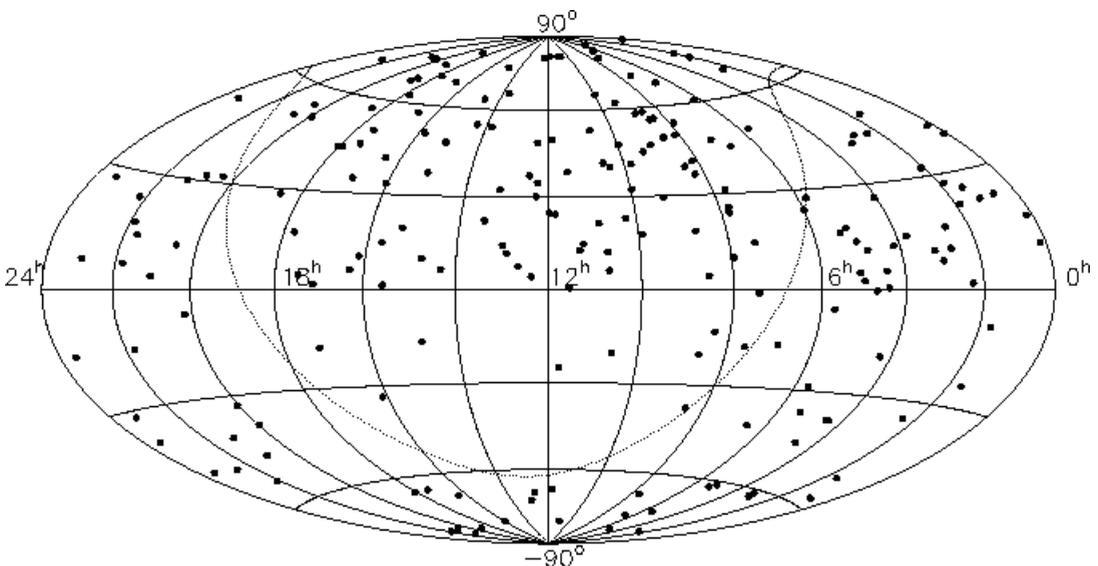


Abb. 3: Verteilung der definierenden Radioquellen des ICRF an der Himmelssphäre

Die Transformation eines Ortsvektors vom erdfesten System \vec{x}_{ITRS} in das raumfeste System \vec{x}_{ICRS} gelingt also mittels der Beziehung

$$\vec{x}_{ICRS} = Q(t) \cdot R(t) \cdot W(t) \vec{x}_{ITRS}$$

Die Definition des CEP geht auf das Jahr 1980 zurück und weist als Eigenschaft dieses fiktiven Pols aus, dass er weder im erdfesten noch im raumfesten System tägliche Bewegungen ausführt. Man kann sich den CEP am besten als Durchstoßpunkt der mittleren Drehimpulsachse der Erde mit der Himmelsphäre vorstellen.

Es sei allerdings bereits an dieser Stelle daraufhingewiesen, dass neue ab dem 1.1.2003 in Kraft getretene Resolutionen der IAU (International Astronomical Union) diesen CEP durch den CIP (Celestial Intermediate Pole; siehe Kapitel 4) ablösen. Auch die obige Transformation basiert ab diesem Zeitpunkt auf einer neuen theoretischen Grundlage (siehe [4], [7]) und damit auf Argumenten mit geänderter theoretischer Bedeutung. Auf eine ausführliche Behandlung der neuen Transformationsmethode muss im Rahmen dieses Artikels jedoch verzichtet werden. Formal sind die konventionelle und neue Methode jedenfalls gleichwertig.

Ein zum Verständnis wichtiger Zusammenhang sei anhand von Abbildung 4 erläutert. Im Prinzip versuchen wir den Durchstoßpunkt der Rotationsachse der Erde mit der raumfesten Himmelsphäre zu jedem Zeitpunkt t zu beschreiben. Die Angabe einer sich schnell ändernden Drehmatrix basierend auf den 3 Eulerschen Winkeln hat sich für den täglichen Gebrauch als nicht praktikabel erwiesen. Die Auftrennung in 5 korrelierte Argumente erlaubt dagegen einerseits die Beschreibung der Lage der Rotationsachse relativ zum Erdkörper (Polbewegung) und andererseits die Beschreibung der Bewegung der Rotationsachse relativ zur Himmelsphäre. Ersetzen wir noch die ‚wahre Rotationsachse‘ der Erde durch eine in unmittelbarer Nähe liegende fiktive mittlere Drehachse, dann lassen sich die 5 Argumente weitgehend gut präzisieren (zumindest deren durch äußere Drehmomente (Sonne, Mond, Planeten) und bereits gut erfasste innere Drehmomente (Atmosphäre, Ozeane,...) vorliegenden Anteile, nicht jedoch die freien Lösungsanteile (z.B. die FCN (*Free Core Nutation*))).

Betrachten wir Frequenzen von Phänomenen, welche die Erdrotation beeinflussen, so unterscheiden sich Angaben im erdfesten System

(ITRS) von jenen im raumfesten System (ICRS) gerade um 1 Zyklus pro Sterntag. Wir sprechen von prograden Frequenzen, wenn die Bewegung in Richtung der Erddrehung erfolgt, und von retrograden Frequenzen, wenn die Anregung in Gegenrichtung verläuft. Interessant für die gegenständlichen Betrachtungen sind nun Drehmomente mit einer Frequenz von nahezu -1 im ITRS. Diese werden z.B. von einem Himmelskörper verursacht, der seine scheinbare Richtung im raumfesten System während einer Rotation der Erde um ihre Achse kaum ändert, also z.B. von der Sonne. Effekte mit gerade diesen Frequenzen von -1.5 bis -0.5 Zyklen pro Sterntag im ITRS (bzw. -0.5 bis $+0.5$ Zyklen pro Sterntag im ICRS) werden der Nutation zugerechnet, Effekte außerhalb dieses Frequenzbandes der Polbewegung. Die Polbewegung ist somit ein im erdfesten System angegebener Bewegungsanteil, die Nutation (wir inkludieren ab hier auch immer die Präzession als extrem langwellige Nutation) ein im raumfesten System gegebener Bewegungsanteil der Orientierung des erdfesten Achsensystems im Raum.

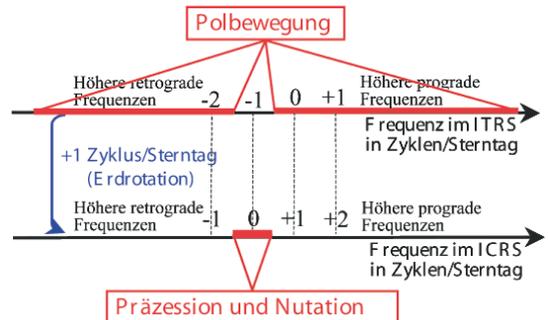


Abb. 4: Frequenzübergang zwischen erdfestem und raumfestem System

Die Trennung von Polbewegung und Nutation ist offensichtlich formal und nicht in der Natur des angreifenden Drehmomentes begründet. Es muss trotzdem betont werden, dass äußere Kräfte weitgehend für Nutationswellen verantwortlich sind und Prozesse im System Erde für die Polbewegung. Allgemein gilt diese Aussage allerdings nicht. So gibt es Drehmomente als Folge der Form des Erdkörpers (genähert als 3-achsiges Ellipsoid), die aufgrund ihrer Frequenz per Definition Polbewegung hervorrufen und umgekehrt z.B. Massenverlagerungen in der Atmosphäre und den Ozeanen mit einer Periode von ca. -1 Zyklus pro Tag im ITRS, die dementsprechend Nutationsanteile begründen.

3. Das Nutationsmodell IAU1980

Das Nutationsmodell IAU1980 umfasste 106 lunisolare Nutationswellen mit Perioden zwischen 4.7 Tagen und 18.6 Jahren. Das Modell war auf die IAU Präzessionstheorie 1976 abgestimmt und nur gemeinsam mit dieser anwendbar. Abbildung 5 erläutert die Auswertung der Nutationsreihen. Die Argumente F_i ergeben sich aus den geozentrischen Elementen von Sonne und Mond, die A_i stellen die Amplituden der einzelnen Wellen der Nutation in Länge $\Delta\psi$, die B_i jene der Nutation in Schiefe $\Delta\varepsilon$ dar. ε_A entspricht der Ekliptikschiefe zur Epoche $t = J2000.0$. Die formale Genauigkeit der Amplituden lag bei 0.1 mas, die äußere Genauigkeit der Amplituden war jedoch in den meisten Fällen um den Faktor 10 schlechter. Für einige der größten Nutationswellen wurden auch zeitabhängige Änderungen der Koeffizienten angegeben.

Nutationsmodell IAU 1980

$$N = R_1(-\varepsilon_A) \cdot R_3(\Delta\psi) \cdot R_1(\varepsilon_A + \Delta\varepsilon)$$

$$\varepsilon_A = 84381'', 448 - 46'', 8150 \cdot t - 0'', 00059 \cdot t^2 + 0'', 001813 \cdot t^3$$

$$\Delta\psi = \sum_{i=1}^{106} (A_i + A'_i t) \sin(ARG)$$

$$\Delta\varepsilon = \sum_{i=1}^{106} (B_i + B'_i t) \cos(ARG)$$

$$ARG = \sum_{j=1}^5 N_j F_j$$

Abb. 5: Formalismus zur Berechnung von Nutation in Länge und Schiefe (IAU1980)

Schon bald nach Implementierung dieses Modells wurde allerdings klar, dass die dahinterliegende Theorie nicht ausreichend war, um aktuelle VLBI-Messungen korrekt zu beschreiben (siehe Abb. 6). Die IAU 1980 Nutationstheorie berücksichtigte zwar grundlegende geophysikalische Eigenschaften des Erdaufbaus, jedoch nicht in ausreichender Weise. Die Steigerung der Messgenauigkeit ging schneller als erwartet vor sich und die Abweichungen vom Modell zeigten bereits Ende der 80-er Jahre Amplituden von einigen mas. Neben den offensichtlich fehlerhaften Amplituden einiger bekannter Nutationswellen verblieben nicht im Modell erfasste lineare Abnahmen der Ekliptikschiefe von -0.3mas/Jahr und der Präzession von -3mas/Jahr . Aufgrund der noch kurzen Messserie war schnell klar, dass die letztgenannten Effekte auch in einem neuen

Modell noch nicht sauber von der Amplitude der langjährigen (z.B. 18.6 Jahre, Mondknoten-drehung) Nutationsterme zu trennen sein werden.

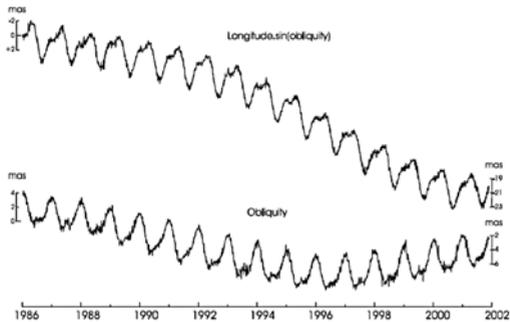


Abb. 6: Mittels VLBI beobachtete Abweichung der Nutation in Länge und Schiefe zur Theorie IAU1980

Mitte der 90-er Jahre gelang es zudem die Amplituden kurzperiodischer Nutationsterme (Perioden < 20 Tage) auch mittels GPS zu bestimmen (siehe [11], [16], [17]). Satellitenverfahren sind zwar aufgrund der vollständigen Korrelation von Bahnelementen und der Nutationswinkel nicht direkt in der Lage Nutations-Offsets (Abweichungen zum Referenzmodell) zu bestimmen. Bei präziser Modellierung möglichst langer Satellitenbahnstücke (≥ 3 Tage) kann jedoch die erste Ableitung der Nutationswinkel mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Das Fehlerverhalten ist dabei für die Amplituden kurzer Nutationsperioden günstiger als bei VLBI, bei langen Perioden werden die Parameter jedoch von Fehlern in der Modellierung des Strahlungsdruckes der Sonne auf die Satelliten überlagert.

4. Das neue Nutationsmodell

1996 wurde Prof. Veronique Dehant von der IAU beauftragt, im Rahmen einer Studiengruppe ein deutlich verfeinertes Nutationsmodell der ‚nicht-starren‘ Erde zu entwickeln. Spätestens hier müssen wir uns nun von der Vorstellung trennen, dass die Beobachtung, Modellierung und Prädiktion der Nutationen der Erde eine den Astronomen vorbehaltene Aufgabe ist. Gerade die Nutationen widerspiegeln neben den von außen wirkenden Drehmomenten durch Sonne, Mond und Planeten in ausgezeichneter Weise die ‚Antwort‘ des gesamten Systems Erde und geben damit Auskunft über deren inneren Aufbau. Diese Aufgabe bedurfte somit der Zusammenarbeit von Astronomen, Geophysikern und Geodäten.

Die Arbeit wurde in die 6 untenstehenden Entwicklungsstufen bzw. Fragestellungen unterteilt. Es muss vorangestellt werden, dass eine detaillierte Behandlung dieser Entwicklungsstufen den Rahmen des vorliegenden Artikels bei weitem übersteigen würde und deshalb einzelne Schritte nur unterschiedlich ausführlich behandelt werden können. Für detaillierte Informationen sei auf [5] verwiesen.

E1. Ist das benützte Erdmodell PREM noch adäquat ? und

E2. Erstellung einer Transferfunktion (*Response*) der Erde für Nutation

Wesentlich für die Transferfunktion ist der gewählte Schalenbau des Erdkörpers. Es muss zumindest ein Dreischalenmodell der Erde bestehend aus einem festen inneren Kern, einem flüssigen äußeren Kern und dem darüber liegenden Mantel in die Rechnung eingehen. In diesen beiden Entwicklungsstufen stellte sich deshalb zuerst die Frage, ob die derzeit im Rahmen des auf rein seismischen Messungen beruhenden PREM-Erdmodells (Preliminary Reference Earth Model, 1981) gültige Vorstellung vom Aufbau des Erdinneren noch adäquat ist. Unter anderem liefert PREM unter Annahme hydrostatischen Gleichgewichtes nicht die beobachteten Werte für die Hauptträgheitsmomente und die dynamische Abplattung der Erde. Ebenso entspricht die aus dem Modell resultierende geometrische Abplattung an der Kern-Mantel-Grenze (CMB) nicht den Beobachtungen.

Um diese Inkonsistenz zu beheben, entwickelten Mathews et al. (siehe [9]) im Rahmen der Arbeitsgruppe eine semi-analytische Lösung für den Erdaufbau, bei der VLBI-Beobachtungen der Nutation herangezogen wurden, um Parameter des PREM-Erdmodells zu variieren. Im Anschluss berechnete man sodann die Antwortfunktion (*Response-Function*) der Erde auf die wirkenden Drehmomente unter Berücksichtigung der durch den Schalenbau implizierten Eigenmodi. In der Nähe der Eigenfrequenzbänder werden die aus dem Gezeitenpotential berechneten Nutationen deutlich verstärkt. Speziell wäre hier die FCN mit einer Periode von ca. 432 Tagen im raumfesten System zu nennen (siehe [15]). Weitere bekannte Eigenmodi sind die Chandler-Frequenz oder der *Tilt-Over-Mode* (TOM), eine kleine gemeinsame Bewegung der Rotationsachse und des Erdkörpers im Raum. Diskutiert (allerdings noch nicht nachgewiesen) wird auch eine eigenständige Rotation des inneren Erdkerns und daraus

folgend ein neuer Eigenmodus der Erde (FCN = *Free Inner Core Nutation*).



Abb. 7: Vorstellung über den Aufbau des Erdinneren / Einflussfaktoren auf das Nutationsmodell

E3. Nutationen der starren Erde

Begonnen wurde mit der Entwicklung des Gezeitenpotentials der Körper des Sonnensystems auf Basis des aktuellen JPL-Ephemeriden-satzes DE403. Die Ableitung der nach Perioden geordneten Gezeitenpotentialterme multipliziert mit dem jeweiligen Distanzvektor liefert die auf die Erde wirkenden Drehmomente. Zu hinterfragen war an dieser Stelle die angestrebte Genauigkeit des Gesamtmodells. Einerseits sollte das Modell jedenfalls besser sein als die derzeit mögliche Messgenauigkeit, andererseits war zu berücksichtigen, dass die Nutationen der starren Erde in einem späteren Schritt mit der frequenzabhängigen Transferfunktion der ‚nicht-starren‘ Erde zu multiplizieren sind und wie bereits erwähnt speziell in der Nähe von Resonanzfrequenzen die Nutationsamplituden kräftig vergrößert werden. Schließlich wurde die angestrebte Genauigkeit jedes einzelnen Terms mit besser als 0.005mas (Terme in der Nähe von Resonanzen besser als 0.001mas = 1 Mikrobogensekunde) festgelegt, um eine Genauigkeit des Gesamtmodells von ca. 0.25mas zu gewährleisten.

Entsprechend diesen Vorgaben wurden im ‚starren Erde Modell‘ alle Effekte die zu Nutationstermen mit Amplituden von größer als 0.001mas führen berücksichtigt. Neben den direkten Attraktionswirkungen von Sonne und Mond (Abb. 8a und 8b) wurden deshalb die Wirkung der Planeten (Abb. 8c) und eine Reihe indirekter Effekte (Abb. 8d-8f) in die Liste der Nutationswellen aufgenommen.

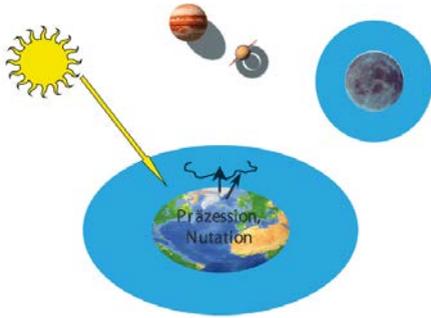


Abb. 8 a: Position der Erde relativ zur Sonne

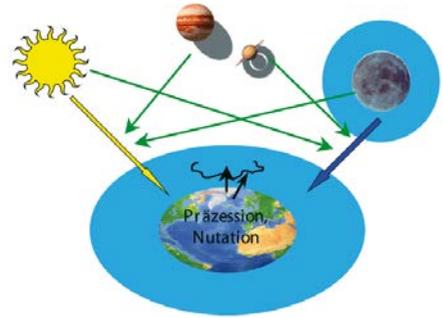


Abb. 8 d: Indirekter Effekt der Planeten auf die Relativpositionen von Erde, Mond und Sonne

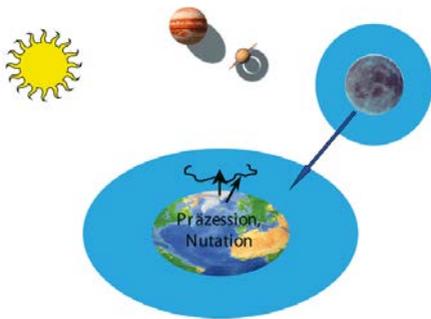


Abb. 8 b: Position der Erde relativ zum Mond

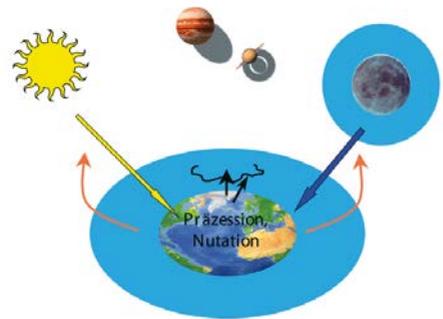


Abb. 8 e: Effekt der Nutationen auf die Nutationen

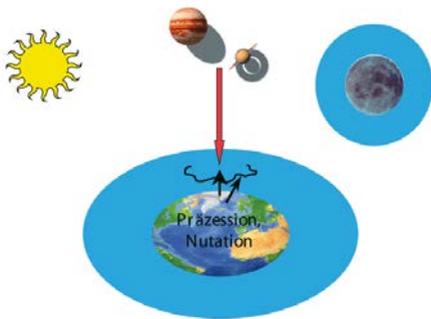


Abb. 8 c: Direkte Attraktion der Planeten

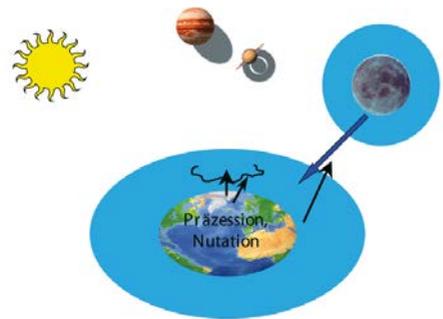


Abb. 8 f: Attraktion des Erdäquatorwulstes auf den Mond / J2-tilt Effekt

E4. Faltung der Nutation der starren Erde mit der Transferfunktion

Wie beschrieben hängt die Genauigkeit des abgeleiteten Nutationsmodells von der Genauigkeit der erzeugten Nutationsserien für eine starre Erde und von der Qualität der Transferfunktion ab. Das Ergebnis der Faltung spiegelt die Präzision beider frequenzabhängigen Komponenten wider und ist damit im allgemeinen hoch. Ausnahmen sind die Bänder in der Nähe der Eigenfrequenzen, wo jegliche Fehlmodellierungen oder nicht berücksichtigte Effekte (z.B. durch die Atmosphäre) durch Resonanzen der Transferfunktion verstärkt werden. Doch kein Nachteil ohne entsprechenden Vorteil. Durch die Verstärkung der Nutationsamplituden werden gerade diese Wellen erst der Beobachtung zugänglich und erlauben somit entsprechende Rückschlüsse.

E5. Atmosphärische und ozeanische Effekte

Schlussendlich ist das Szenario noch realistischer zu gestalten, indem der Einfluss der Ozeane und der Atmosphäre berücksichtigt wird (siehe [12], [13]). Es ist festzuhalten, dass die Drehimpulsachse der Erde nur durch äußere Kräfte verändert werden kann (Drehimpulssatz). Das erstellte Modell beschreibt aber die Bewegungen eines fiktiven Pols (des CIP) im raumfesten System und Nutationsterme folgen per Definition aus täglichen Anregungen (im erdfesten System) in Gegenrichtung zur Erddrehung, die eben auch von der Erdatmosphäre (Winde, Druckfelder) stammen können. In diesem Fall führen also innere Prozesse sehr wohl zu Nutationsanteilen. Die wesentlichen von der Atmosphäre stammenden Anteile manifestieren sich als jährliche und halbjährliche Nutationsanteile mit Amplituden von rund 0.01 mas. Auch die ozeanischen Gezeiten tragen wesentlich zu gewissen Nutationswellen bei, speziell im Periodenbereich von 13.7 Tagen.

Die Berechnung der atmosphärischen und ozeanischen Nutationsanteile basiert auf zwei mathematisch unterschiedlichen Ansätzen, die von den Ergebnissen her zwar als gleichwertig angesehen werden können, allerdings nicht vom dahinter stehenden rechnerischen Aufwand und den benötigten Datensätzen. Der erste Ansatz (*Torque Approach*) summiert die auf die feste Erde wirkenden Drehmomente. Der zweite Ansatz (*Angular Momentum Approach*) basiert auf der Ausgeglichenheit des Drehimpulsbudgets des gesamten Systems Erde+Ozeane+Atmosphäre.

Die Verbindung der Ansätze besteht in der Tatsache, dass die zeitliche Ableitung des Drehimpulses gleich den summierten Drehmomenten sein muss. Abbildung 9 illustriert einige Quellen für sogenannte ‚innere Drehmomente‘ wie die Reibung an den Grenzflächen der Systemkomponenten oder auch den auf die Topographie ausgeübten Druck durch zeitlich variable Druck- und Windfelder (Topographische Drehmomente).

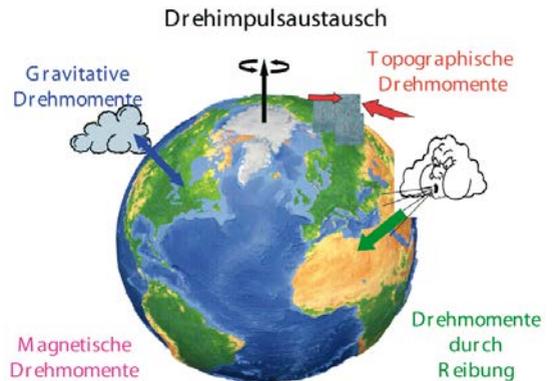


Abb. 9: Drehimpulsaustausch verursacht durch ‚innere Drehmomente‘

E6. Vergleich der Resultate mit aktuellen Messungen

Erste Vergleiche mit neuesten VLBI-Messungen zeigen über weite Bereiche des Frequenzspektrums Übereinstimmung mit dem Modell im Bereich von 0.1mas. Kritische Frequenzbereiche sind aber weiterhin die sehr langperiodischen Nutationswellen (einige Jahre bis 18.6 Jahre), da hier noch nicht ausreichend Beobachtungsreihen vorliegen, und Nutationsamplituden in der Nähe der FCN (Resonanz). Ebenfalls problematisch sind sehr kurzperiodische Nutationswellen mit Perioden unter 14 Tagen. Da die VLBI Beobachtungen über lange Zeiträume nur im 7-Tage Rhythmus ausgeführt wurden, fehlt die zur Bestimmung nötige zeitliche Auflösung. Zur Festlegung dieser Nutationsamplituden können die Mikrowellensatellitenverfahren (z.B. GPS) wichtige Beiträge liefern.

Ende 1999 waren die Arbeiten abgeschlossen. In Summe umfasst das neue Modell 678 lunisolare und 687 planetare Terme, welche die Richtung des CIP im inertialen Referenzsystem mit einer Genauigkeit von 0.2 mas (entspricht ca. 6mm an der Erdoberfläche) festlegen (siehe Abb. 10a-10c). Gleichzeitig wurde auch das Präzessions-

modell angepasst und ein deutlich weniger Terme umfassendes Nutationsmodell IAU2000B (80 lunisolare Terme + konstante Planetenkorrektur) für geringere Genauigkeitsansprüche bis zu 1mas veröffentlicht. Das IAU2000A/B Präzessions-Nutations-Modell wurde von der IAU im August 2000 beschlossen und trat am 1.1.2003 verbindlich in Kraft. Die für die Geodäsie wesentlichen an dieser Generalversammlung beschlossenen Resolutionen besagen:

Resolution B1.6: Das Präzessionsmodell IAU 1976 und Nutationsmodell IAU1980 wird durch das Präzessions-Nutationsmodell IAU2000A/B ersetzt.

Resolution B1.7: Der Celestial Intermediate Pole (CIP) tritt an die Stelle des Celestial Ephemeris Pole (CEP). Das neue Präzessions-Nutationsmodell bezieht sich auf den CIP, der per Definition nur Bewegungen mit Perioden größer als 2 Tage im raumfesten System ausführt.

Resolution B1.8: Die Transformation zwischen erdfestem und raumfestem System wird neu formuliert. (Einführung des *Terrestrial Ephemeris Origin* (TEO) und des *Celestial Ephemeris Origin* (CEO)). Der aktuelle Erdrotationswinkel ist der im Äquator gemessene Winkelabstand zwischen TEO und CEO.

Nutationsmodell IAU2000A/ planetar

$$\Delta\psi = \sum_{j=1}^{687} A_j \sin(ARG) + A'_j \cos(ARG)$$

$$\Delta\varepsilon = \sum_{j=1}^{687} B_j \cos(ARG) + B'_j \sin(ARG)$$

$$ARG = \sum_{j=1}^{14} N_j F_j$$

Abb. 10 c: planetare Terme

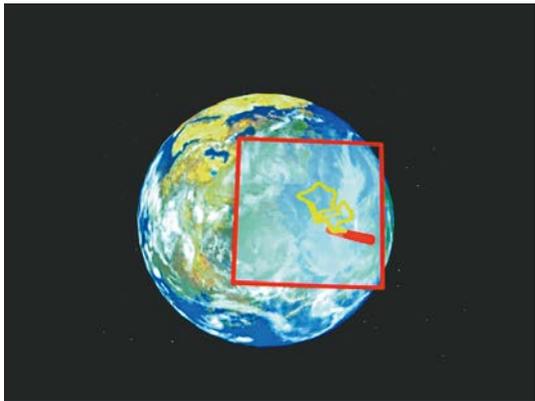


Abb. 11: Wahre Bewegung des CIP

Nutationsmodell IAU2000

$$PN = R_3(-E)R_2(-d)R_3(E)R_3(s)$$

$E, d =$ Koordinaten des CIP im ICRS
 $E, d =$ Funktionen von $\Delta\psi, \Delta\varepsilon$
 $s =$ Bewegung des CEO am Äquator

Abb. 10 a: Formalismus zur Berechnung von Nutation in Länge und Schiefe (IAU2000)

Nutationsmodell IAU2000A/ lunisolare

$$\Delta\psi = \sum_{i=1}^{678} (A_i + A'_i t) \sin(ARG) + (A''_i + A'''_i t) \cos(ARG)$$

$$\Delta\varepsilon = \sum_{i=1}^{678} (B_i + B'_i t) \cos(ARG) + (B''_i + B'''_i t) \sin(ARG)$$

$$ARG = \sum_{j=1}^5 N_j F_j$$

Abb. 10 b: lunisolare Terme

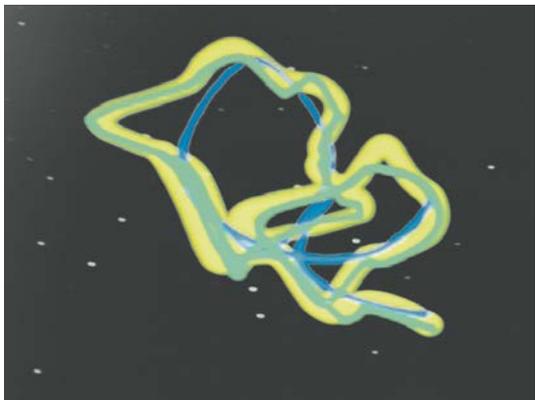


Abb. 12: Bewegung der Polachse (gelb) überlagert mit Modell IAU1980 (blau) und Modell IAU2000 (grün)

Die Abbildungen 11 und 12 sollen nochmals den erzielten Fortschritt verdeutlichen. In Abbildung 11 wird in gelb die wahre Bewegung der Polachse im raumfesten System über einen Zeitraum von rund 2 Jahren relativ zur Ausgangs-epoche dargestellt. Die folgende Abbildung 12 zeigt zusätzlich zur wahren Bewegung des CIP den für den gleichen Zeitraum mit dem Vorgän-

germodell IAU1980 prädizierten Verlauf (in blau überlagert) und den mit dem neuen Modell IAU2000 prädizierten Verlauf (in grün überlagert). Lagen die Abweichungen des alten Modells noch bei gut 20mas (das entspricht an der Erdoberfläche rund 60cm) so zeigt das neue Modell nur mehr Abweichungen von rund 0.2 mas (6 mm an der Erdoberfläche). Es beschreibt damit die Bewegung des CIP um einen grob geschätzten Faktor 100 besser.

5. Ausblick

Schließlich bleiben noch die beiden Fragen offen welchen Nutzen die Allgemeinheit aus der Beobachtung und Modellierung des Rotationsverhaltens der Erde zieht und welche Anstrengungen nötig wären, um das neue Nutationsmodell weiter zu verbessern.

Ein Nutzen ergibt sich direkt aus der Tatsache, dass jede Anwendung, die aus der im raumfesten System bekannten Bewegung von Satelliten die Position des Beobachters auf unserer Erde ableitet bzw. umgekehrt aus erdgestützten Beobachtungen eine Satellitenbahn bestimmt, die exakte Orientierung der Erde im Raum benötigt. Darunter fallen unter anderem die ESA-Erdbeobachtungsmissionen ENVISAT und GOCE, alle Navigationssatellitensysteme wie GPS, GLO-NASS oder das künftige europäische GALILEO-System. Natürlich auch alle interplanetaren Missionen der ESA und NASA. Zudem erlaubt die Beobachtung der Nutation neue Schlüsse über den Aufbau des Erdinneren wie z.B. die Abplattung des Erdkerns zu ziehen als auch neue Einsichten in die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und der festen Erde zu gewinnen. Ein weiterer reizvoller Schritt ist die Umlegung der erarbeiteten Methodologie auf das Studium der Nutationen des Planeten Mars im Rahmen des NetLander Projektes der ESA.

Um das neue Nutationsmodell zu verbessern seien einige Stoßrichtungen angegeben. Einerseits ist die Transferfunktion zu überarbeiten und dies gelingt nur über eine bessere Modellierung des inneren und äußeren Erdkerns. Physikalische und geometrische Eigenschaften des Erdkerns beeinflussen im speziellen die Eigenfrequenzen und damit die Resonanzen der Transferfunktion. Das zweite Feld, in dem Verbesserungen zu erwarten sind, ist die Modellierung der von den Ozeanen und der Atmosphäre stammenden Beiträge zur Nutation. Hier gibt es bereits erste Erfolg versprechende Arbeiten (siehe [2],[3]) betreffend des Atmosphäreneinflusses. Die Güte

dieser Modellierungen hängt nicht zuletzt von einer Steigerung in Genauigkeit und zeitlicher Auflösung der von den internationalen Wetterdiensten gelieferten Wind- und Druckfelder ab. Nicht völlig zufriedenstellend ist auch der derzeit gewählte semi-analytische Ansatz, der einige Parameter des Erdkörpers an langjährige VLBI-Beobachtungsserien anpasst. Hier ist die Geophysik gefordert, neue seismische Modelle des Erdaufbaus zu entwickeln, deren direkte Integration die beobachteten Nutationen liefert. Schlussendlich sind natürlich auch die geodätischen Raumverfahren (vorrangig VLBI, teilweise GNSS) gefordert, präzise und zeitlich hochauflösende Messserien zur Verifikation der Modelle beizutragen (siehe Abb. 13).

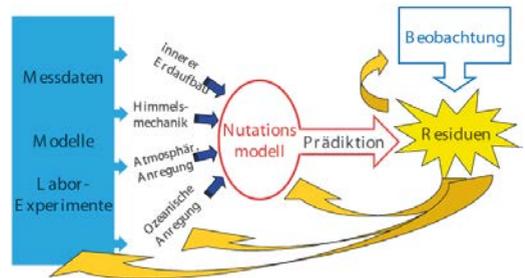


Abb. 13: Schritte zur Erstellung, Verifikation und Verbesserung eines neuen Nutationsmodells

Derzeit ist die Steigerung der Genauigkeit des Nutationsmodells um eine weitere Zehnerpotenz bei weitem nicht in Sicht. Es ist also zu erwarten, dass dem Modell IAU2000 eine ebenso lange Lebensdauer beschieden ist wie dem Vorgängermodell IAU1980.

Dotiert wurde der Descartes-Preis mit einem Betrag von 300000 €, der nach Absprache aller Mitglieder der Studiengruppe in die Weiterentwicklung des Nutationsmodells geleitet wird. Dies erfolgt durch Finanzierung von Doktoratsarbeiten und der Durchführung wissenschaftlicher Treffen. Das Institut für Geodäsie und Geophysik der TU-Wien wird in diesem Sinne natürlich intensiv weiterarbeiten, um die Position an der Spitze der weltweiten Forschung im Themenbereich Nutation halten zu können.

Danksagung

Für die Bereitstellung der in diesem Artikel verwendeten Graphiken 7-9, 11-13 sei der Arbeitsgruppe 'Non-rigid Earth Nutation Model' im Allgemeinen und Prof. V. Dehant im Speziellen gedankt.

Literaturverzeichnis

- [1] *Beutler G.*: Himmelsmechanik des erdnahen Raumes, Astronomisches Institut der Universität Bern, 2000.
- [2] *Brzezinski A.*: On the atmospheric excitation of the free modes in Earth rotation, Proc. Journées 1999 & IX. Lohrmann-Kolloquium (M. Soffel and N. Capitaine, eds.), Paris Observatory, 153-156, 2000.
- [3] *Brzezinski A., Ch. Bizouard Ch., Petrov S.*: Influence of the atmosphere on Earth rotation: what can be learned from the recent atmospheric angular momentum estimates? Surveys in Geophysics, Vol.23, 33-69, 2002.
- [4] *Capitaine N.*: Comparison of old and new concepts: The Celestial Intermediate Pole and Earth Orientation Parameters; IERS Technical Note 29, S. 35-44, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2002.
- [5] *Dehant et al.*: Considerations concerning the non-rigid Earth Nutation Theory, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Volume 72, S. 245-310, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [6] *Hefty J., Rothacher M., Springer T., Weber R., Beutler G.*: Analysis of the First Year of Earth Rotation Parameters with a Sub-Daily Resolution gained at the CODE Processing Center of the IGS, Journal of Geodesy, Vol. 74, Nr. 6, pp. 479-487, Springer-Verlag, 2000.
- [7] *IERS Conventions 2003. Dennis D. McCarthy and Gérard Petit.* IERS Technical Note 32, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2003.
- [8] *IERS (www)*: <http://itrf.ensg.ign.fr/> Homepage of the International Earth Rotation and Reference Systems Service; ITRS Product Centre.
- [9] *Mathews P.M., Herring T.A., Buffet B.A.*: Modelling of Nutation-Precession: New nutation series for nonrigid Earth, and insights into the Earth's Interior, Journal of Research, Vol. 107, Nr.B4, 10.1029/2001JB000390, 2002.
- [10] *Moritz H., Mueller I.I.*: Earth Rotation, Theory and Observation. The Ungar Publishing Company, New York, 1987.
- [11] *Rothacher M., Beutler G., Herring T.A., Weber R.*: Estimation of Nutation using the Global Positioning System. Journal of Geophysical Research, Vol. 104, Nr.B3, S. 4835-4859, 1999.
- [12] *Schuh H. et al.*: Erdrotation und globale dynamische Prozesse. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2003.
- [13] *Schuh H., Varga P., Seitz T., Böhm J., Weber R., Mentes G., Zavoti J., Westerhaus M.*: Sub-semidiurnal variations of the EOP observed by space geodesy compared with other geophysical phenomena, Journées 2001/UMR 8630/CNRS, Proceedings edited by N. Capitaine, 2003.
- [14] *Vondrak J., Ron C., Weber R.*: Combined VLBI/GPS series of precession-nutation and comparison with IAU 2000 model; Astronomy & Astrophysics Manuscripts, Vol. 397, S. 771 – 776, 2003.
- [15] *Vondrak J., Weber R., Ron C.*: Free Core Nutation: Direct Observations and Resonance Effects, Astronomy & Astrophysics Manuscripts, Vol. 444-1, S. 297 – 303, 2005.
- [16] *Weber R., Rothacher M., Beutler G.*: Contribution of the GPS to Monitor Earth Orientation Parameters, IERS Technical Note 28; S. 43-51, 2000.
- [17] *Weber R.*: The Ability of the GPS to Monitor Earth Rotation Variations. Habilitationsschrift. Technisch-naturwissenschaftliche Fakultät. Vienna University of Technology, 2000.

Anschrift des Autors

Ao.Univ Prof. Dr. Robert Weber, Technische Universität Wien, Institut für Geodäsie und Geophysik, Gußhausstrasse 27-29, A-1040 Wien, email: rweber@mars.hg.tuwien.ac.at

Univ. Prof. Dr. Ing. Harald Schuh, Technische Universität Wien, Institut für Geodäsie und Geophysik, Gußhausstrasse 27-29, A-1040 Wien, email: hschuh@mars.hg.tuwien.ac.at

Dipl.Ing. Sigrid English, Technische Universität Wien, Institut für Geodäsie und Geophysik, Gußhausstrasse 27-29, A-1040 Wien, email: senglish@mars.hg.tuwien.ac.at

Dipl. Ing. Kristyna Snajdrova, Technische Universität Wien, Institut für Geodäsie und Geophysik, Gußhausstrasse 27-29, A-1040 Wien, email: ksnajd@mars.hg.tuwien.ac.at