

Festvortrag

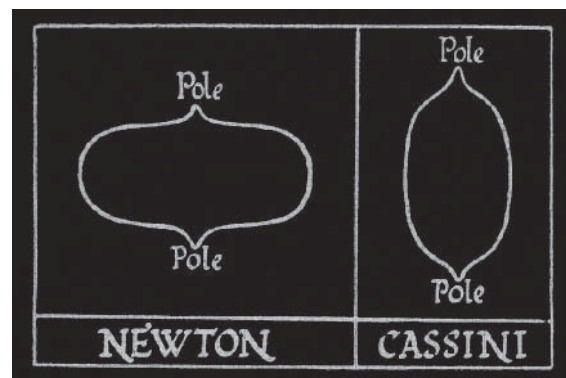
Die Figur der Erde

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Rummel

César Cassini de Thury, französischer Astronom und Geodät, gab vor 250 Jahren, d.h. zur Gründungszeit der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, den Anstoß, Bayern trigonometrisch zu vermessen. Dominicus von Linprun, einer der Gründerväter dieser Akademie, schrieb hierzu im Jahre 1764: „Um hierdurch diejenigen geographischen Finsternisse zu vertreiben, die nach dem Vorgeben der Cosmographischen Nachrichten über diesen Theil von Deutschland annoch herrschen sollen.“ Cassini, der dritte große Gelehrte aus einer Familiendynastie herausragender Astronomen, hatte die großartige „Carte de France de l'Académie“ geschaffen, die erste geometrisch hochwertige Darstellung Frankreichs – sie wird auch schlicht als „Carte de Cassini“ bezeichnet. Nun wollte er dieses Werk nach Osten hin erweitern, von Straßburg aus über München nach Wien. 1761 wurde Cassini Ehrenmitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Hundert Jahre früher stand der Disput um die wahre Figur der Erde im Mittelpunkt der Naturwissenschaften. Es war ein Streit entbrannt, ob die Erdfigur zu den Polen hin abgeplattet oder aber gestreckt sei. Jean-Dominique Cassini, Großvater von César, war Protagonist der zweiten Auffassung und hinter ihm scharten sich einige der prominentesten Köpfe der 1666 gegründeten französischen Akademie der Wissenschaften. Es mutet überraschend an, dass Jean-Dominique

Abb. 1: Eine Karikatur zur historischen Kontroverse zwischen den beiden gegensätzlichen Auffassungen über die wahre Figur der Erde (aus: Chandrasekhar, 1969).



Cassini die Meinung vertrat, die Erde sei zu den Polen hin gestreckt, denn er war es, dem es als erstem gelungen war, mit astronomischen Messungen die Abplattung des Jupiters nachzuweisen.

Newton war Meinungsführer der Gegenpartei. Es ging also gleichzeitig um einen Meinungsstreit der beiden großen Akademien, der französischen und der Royal Society in London. Es mag nicht verwundern, dass Newton Recht behielt. Er konstruierte ein Gedankenexperiment: ein durchgehender Kanal, der vom Nordpol zum Erdmittelpunkt reicht und sich in der Äquatorebene bis zur Erdoberfläche fortsetzt. Man denke sich diesen Kanal mit Wasser gefüllt und die Erde sich drehend. Dann betrachte man das hydrostatische Gleichgewicht der beiden kommunizierenden Wassersäulen unter dem Einfluss der Erdanziehung und der in der Äquatorebene wirkenden Zentrifugalkraft.

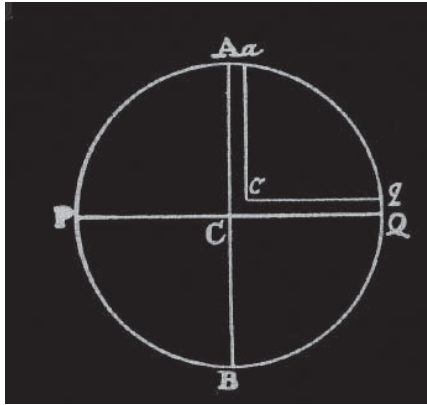


Abb. 2: Darstellung aus Newtons *Principia* (S. 106) zur Erläuterung seiner Auffassung einer durch die Erdrotation verursachten Abplattung.

Newton konnte mit diesem Gedankenexperiment seine Auffassung einer an den Polen abgeplatteten Erde erläutern, gleichzeitig benannte er einen plausiblen Wert für die tatsächliche Verkürzung der Erde an den Polen: Er errechnete, dass der Polradius ungefähr 27,7 km kürzer sein müsste als der Äquatortradius. Erst Jahre später wurde auch von französischer Seite mit extrem aufwändigen und äußerst sorgfältigen geodätisch-astronomischen Messungen Newtons Ergebnis bestätigt. Es wurden unter großen Mühen und Entbehrungen Meridianbögen in Peru und Lappland astronomisch und trigonometrisch vermessen, d.h. am Äquator und in hohen nördlichen Breiten. Dabei ermittelt man entlang eines Meridians durch Messung einer Basislinie und einer lang gestreckten Dreieckskette die Bogenlänge des Meridianabschnitts. Aus der zusätzlichen Bestimmung der astronomischen Breite der beiden Endpunkte der Dreieckskette ergibt sich der Krümmungsradius. Der Vergleich der Krümmungsradien zweier Meridianbögen erlaubt den Rückschluss auf die Erdabplattung. Es war dies die große Leistung insbesondere des Astronomen Maupertuis.

Voltaire, ein großer Bewunderer Newtons und zu jener Zeit auch ein Freund Maupertuis', gratuliert ihm mit den Worten: „Aplati les pôles et les Cassini“ (Ihr habt die Pole platt gedrückt und auch die Cassinis) – gemeint sind Vater und Sohn Cassini. An anderer Stelle sagt er über seine französischen Landsleute: „Vouz avez confirmé dans les lieux

physikalische – Abstraktion. Carl Friedrich Gauss gibt folgende Definition: „Was wir im geometrischen Sinn Oberfläche der Erde nennen, ist nichts anderes als diejenige Fläche, welche überall die Richtung der Schwere senkrecht schneidet, und von der die Oberfläche des Weltmeers Theil ausmacht.“ Der Astronom Listing führte 1873 für diese physikalische Erdfigur den Begriff „Geoid“ ein. Das Geoid entspricht der hypothetischen Oberfläche der Ozeane in völliger Ruhe, ohne Gezeiten, Wind und Wellen und fortgesetzt gedacht auch unter den Kontinenten. Es ist eine Niveaufläche, überall horizontal und ausschließlich determiniert durch die Gravitationswirkung der Massenverteilung der Erde und deren Rotation: eine die Erde umspannende, perfekte Wasserwaage. In der wissenschaftlichen Frage geht es dabei bis ins 20. Jahrhundert um die Abweichungen des Geoids von einer idealisierten Erde: flüssig, rotierend und in hydrostatischem Gleichgewicht.

Am 4. Oktober 1957 wurde der erste künstliche Satellit in eine Umlaufbahn um die Erde gebracht, Sputnik-1. Dieses Ereignis markiert den Eintritt ins Weltraumzeitalter. Aus den sehr primitiven Radiosignalen von Sputnik-1 und dem im gleichen Jahr gestarteten Sputnik-2 gelang es dem jungen britischen Ingenieur King-Hele, die Erdabplattung sehr genau zu ermitteln. Das Prinzip ist dabei die Bestimmung der Präzession, d.h. der Kreiselbewegung der Bahnebene des Satelliten bezüglich des Fixsternhimmels. Die Winkelgeschwindigkeit dieser Bewegung ist proportional zur Erdabplattung; für eine kugelförmige Erde wäre sie null. Noch im Jahr 1958 publizierte King-Hele seine Ergebnisse in der Zeitschrift *Nature*. In gewisser Weise konnten mit diesem Moment die aufwändigen geodätisch-astronomischen Arbeiten von zwei Jahrhunderten ad acta gelegt werden. In seinem Buch berichtet King-Hele später, wie ihn – den jungen Unbekannten – die drei prominentesten britischen Geophysiker und Geodäten Jeffreys, Bomford und de Graaff-Hunter aufsuchten, um besorgt die traditionellen Ergebnisse zur Erdabplattung mit seinen Berechnungen zu vergleichen. Die neuen Zahlen und ihre hohe Genauigkeit waren jedoch unwiderlegbar.

Das von King-Hele dabei angewandte Prinzip, die Messung der Kreiselbewegung der Bahnebene künstlicher Satelliten, wird noch immer verwendet, heute jedoch, um zeitliche Veränderungen der Erdabplattung nachzuweisen. Allerdings werden zu diesem Zweck millimetergenaue Laserentfernungsmessungen eingesetzt, zu sehr kompakten, mit Reflektoren bestückten Satelliten.

Die Messreihe der Jahre 1979 bis 1998 zeigt: Die Erde wird stetig kugelförmiger, wenn auch nur minimal. Die polnahen Gebiete haben sich nach der letzten Eiszeit von den auf ihnen lastenden Eismassen befreit, Landhebungen in Kanada und Skandinavien sind seither die Folge, Mantelmaterial fließt im Erdinneren nach. Diese Prozesse machen die Erde kugelförmiger. Nur in den zurückliegenden 15 Jahren scheint dieser Trend ins Stocken geraten zu sein. Sehr leicht wäre man

versucht, die Ursachen dieser Trendwende mit dem Klimawandel in Verbindung zu bringen. Verschiedene Modellrechnungen, diese Wende durch Verlagerungen im globalen Wasserhaushalt, schmelzende Polkappen, oder den Anstieg des Meeresspiegels zu erklären, waren nicht schlüssig. Eine sehr langperiodische Schwingung im Pazifik, ausgelöst durch ein El Niño-Ereignis, scheint des Rätsels Lösung zu sein.

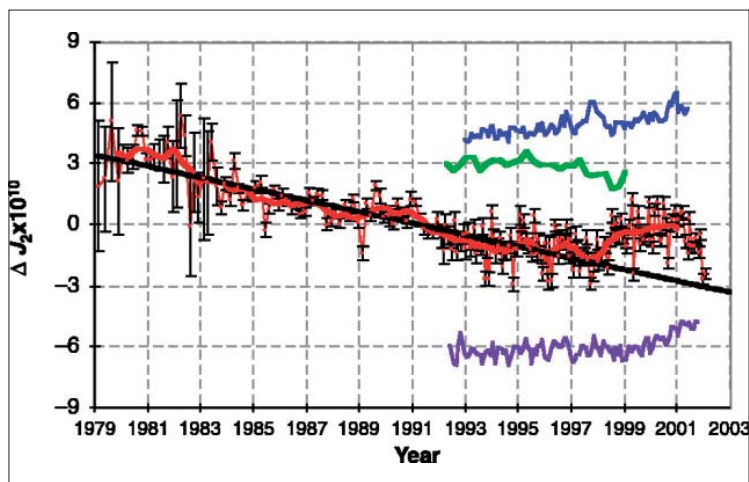


Abb. 4: Zeitreihe der Veränderung der Erdabplattung (aus: Cox & Chao, 2002). Es ist eine stetige, wenn auch sehr kleine Abnahme der Erdabplattung erkennbar (schwarze durchgezogene Linie); nur ab ca. 1997 scheint dieser Trend ins Stocken zu geraten. Die vertikal versetzten Kurven ab 1993 sind Versuche, die Trendwende durch einige Prozesse im Erdsystem zu erklären.

Mit einem Raumfahrtexperiment soll nun die Bestimmung der Erdfigur auf ein vollkommen neues Niveau gehoben werden. Am 17. März 2009 wurde nach 20 Jahren Vorarbeiten der Satellit GOCE in eine Erdumlaufbahn gebracht, ein Satellit der europäischen Raumfahrtagentur ESA. Nach meinem Empfinden ist es der schönste aller erdwissenschaftlichen Satelliten. Vielleicht bin ich jedoch nicht unvoreingenommen. Seine elegante, windschlüpfrige Form wurde gewählt, um den Restluftwiderstand der Atmosphäre auf das Satellitengehäuse zu minimieren.

GOCE ist die Abkürzung für „Gravity and steady-state Ocean Circulation Explorer“. Das Akronym bringt zum Ausdruck, dass es bei dieser Mission um die Messung des Gravitationsfelds, aber auch um die Bestimmung der Meeresströmungen geht. Erstmals wird dabei das Messprinzip der Gravitationsgradiometrie im Weltraum erprobt. Es ist der Versuch, die lokale Geometrie des Gravitationsfelds der Erde zu vermessen, die Krümmungen von Lotlinien und Niveauflächen. Das Messinstrument kann als ein entfernter Verwandter der im Labor für

Gravitationsexperimente verwendet Drehwaage gesehen werden. Der ungarische Physiker und Geodät Loránd Eötvös entwickelte am Anfang des vorigen Jahrhunderts eine Drehwaage, mit der sich Gravitationsgradienten im Felde messen lassen. Die Satellitenmission ist der paradox anmutende Versuch, Schwere im Zustand der Schwerelosigkeit zu messen. Wirkliche Schwerelosigkeit herrscht nur in einem Punkt im Raumschiff: in seinem Zentrum. Nur dort verharrt ein Astronaut im perfekten Schwebezustand, denn die Wirkung der Erdanziehung auf den Satelliten und auf den Astronauten ist in diesem Punkt identisch. Es entsteht keine Relativbewegung, der Astronaut schwebt im Ruhezustand. Angenommen, der Astronaut lässt einen Probekörper los, nicht im Zentrum, sondern einen Meter davon entfernt. Da er sich nicht im Satellitenzentrum befindet, „fühlt“ er das Gravitati-

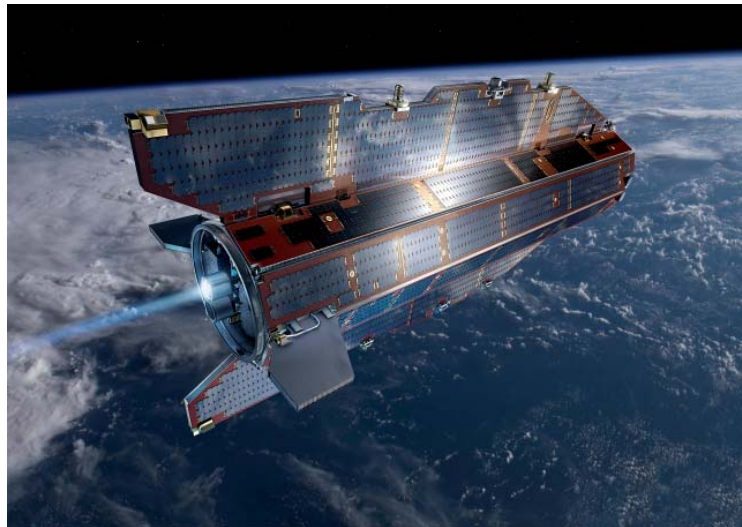


Abb. 5: Der Satellit GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA.

onsfeld der Erde anders als der Satellit. Er beginnt deshalb, durch das Weltraumlabor zu driften. Von Ort zu Ort ist die Erdanziehung auf einen Probekörper – wenn auch minimal – anders. Der Effekt ist sehr, sehr klein, nur etwa 1 Millionstel der Erdanziehung hier im Saal, aber er lässt sich messen. In der englischen Sprache wird daher korrekt unterschieden zwischen „zero-g“ für Schwerelosigkeit und „micro-g“, also „Mikroschwerkraft“. Um eine räumliche Vorstellung der Krümmungen des Gravitationsfelds zu erhalten, wird diese Differenz an sechs Stellen im Satelliten gemessen, wiederum jeweils auf ein Millionstel genau.

Man misst also Gravitationssignale auf ein Millionstel eines Millionstels der Erdanziehung genau.

Sehr empfindliche Messsensoren wurden zu diesem Zweck in einem Labor in Paris entwickelt. In jedem dieser Instrumente wird ein quaderförmiger Probekörper in einem elektrostatischen Feld schwebend gehalten, ohne jemals die Wände der Messkammer zu berühren. Der Spalt zwischen Quader und Messkammer beträgt nur Bruchteile eines Millimeters. Mir wurde gesagt, es bedurfte der ruhigen Hand an einem sehr ruhigen Tag des ältesten Laboringenieurs, um die Probekörper überhaupt in die Präzisionsgeräte einführen zu können. Das Ensemble aus sechs Sensoren bildet das Gravitationsgradiometer.



Abb. 6: Gravitationsgradiometer des Satelliten GOCE, bestehend aus sechs äußerst genauen Beschleunigungsmesssystemen.

Ein sehr aufwändiges Weltraumlabor musste für das Gravitationsexperiment um dieses Sensorsystem herum konstruiert werden, mit mehreren technischen Neuheiten, um die Güte der diffizilen Messungen zu gewährleisten. Mit einem neu entwickelten europäischen GPS-Empfänger wird die Bahn des Satelliten zentimetergenau verfolgt. Um die Orientierung des Satelliten zu wissen, beobachtet man den Sternenhimmel astronomisch mit einem Teleskop. Mit Hilfe der Feldlinien des Erdmagnetfelds wird der Satellit wie von sachter Hand um die Erde geleitet. Veränderungen des Gravitationsfeldes des Satelliten selbst müssen ausgeschlossen werden. Dazu wird das Innere des Weltraumlabors auf ein Zehntausendstel Grad temperaturstabil gehalten; es gibt auch keinerlei bewegliche Teile im Satelliten. Insbesondere umkreist der Satellit die Erde in einer Höhe von nur 260 km. Es ist die niedrigste Bahnhöhe, die jemals für ein wissenschaftliches Experiment gewählt wurde. Durch die Nähe zum Erdkörper wird das Gravitationssignal verstärkt. Schon nach wenigen Tagen würde GOCE in die Atmosphäre abtauchen, würde man nicht mit kleinen Triebwerken dem Bremsseffekt des in dieser Höhe noch verbleibenden „Luftwiderstands“ gegensteuern.

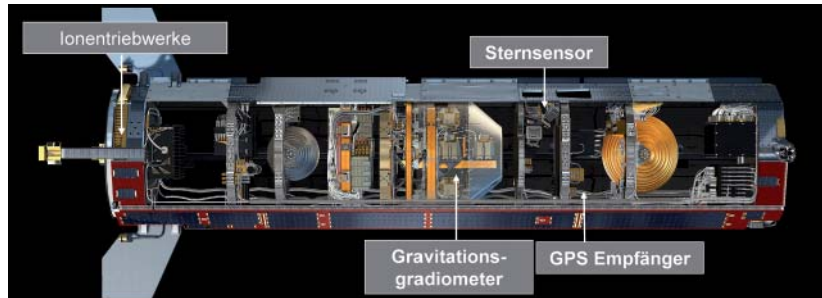


Abb. 7: Das gesamte Sensorsystem des Satelliten GOCE. In der Mitte befindet sich das Gravitationsgradiometer (vgl. Abb. 6); außerdem enthält es einen GPS-Empfänger mit Antennen, drei Sternsensoren und Iontriebwerke.

Jeden Tag umkreist der Satellit 16-mal die Erde. In zwei Monaten entstand so eine sehr gleichmäßige Überdeckung der Erde mit Satellitenumläufen. Der erste Messzyklus ergibt bereits ein relativ detailliertes Bild der physikalischen Figur der Erde, des Geoids. Die in Abbildung 8

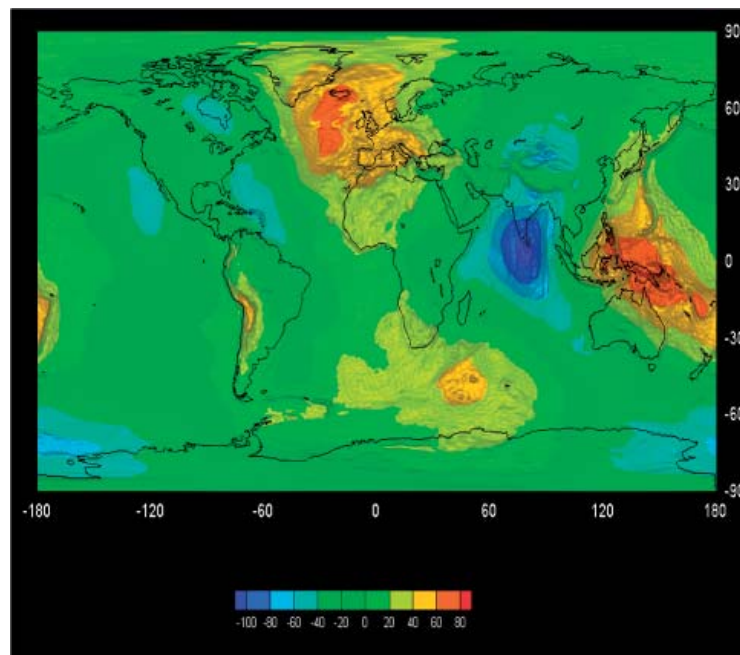


Abb. 8: Geoid aus zwei Monaten Messdaten von GOCE. Die Weltkarte zeigt das Geoid relativ zu einer best anschließenden Ellipsoidfigur. Die Geoidhöhen sind in Metern gezeigt.

gezeigte Weltkarte ist eine Darstellung dieser weltumspannenden Wasserwaage, so wie sie sich rein aus dem Gravitationsfeld der Erde ergibt. Die Undulationen sind die Abweichungen der Geoidfläche von einem bestanschließenden Ellipsoid. Sie schwanken nur im Bereich von 100 Metern und doch helfen diese Strukturen, unsere Erde besser zu verstehen. Wissenschaftlich gesehen hat das Geoid eine doppelte Funktion: Einerseits gibt es uns – gleich einer Lupe – einen Einblick in die Dynamik im Inneren unseres Planeten; andererseits, da das Geoid der Oberfläche des hypothetischen Ruhezustands der Weltmeere entspricht, ist es eine ideale Referenz, um die Bewegungsmuster der tatsächlichen Ozeane zu untersuchen.

Das Bild ähnelt auf den ersten Blick einer topographischen Karte, sie zeigt jedoch kaum Übereinstimmung mit der Verteilung der Kontinente. Das blau dargestellte, große Tief südlich von Indien widerspiegelt ein gewaltiges Massendefizit, verursacht durch das Abtauchen einer großen tektonischen Platte tief in den Erdmantel. Wie zum Beispiel beim Abtauchen eines großen Steins in weichem Mörtel, bleibt über dem abgetauchten Stein lange eine Eindellung, ein Defizit an Masse zurück. Die rot dargestellte Erhebung im Bereich von Indonesien zeigt einen Massenüberschuss. Aber auch hier ist die Ursache eine abtauchende Platte, die sich jedoch noch in weit geringerer Tiefe befindet. Der Prozess ist noch im Frühstadium. Der in den Mörtel abtauchende Stein befände sich hier noch knapp unter der Oberfläche. Es ergibt sich eine Wölbung. Auf der Geoidkarte ist auch ein Hoch um Island erkennbar, wo heißes Mantelmaterial aufsteigt und sich zu einem Gebirgsrücken aufwölbt. Eine detaillierte Analyse lässt viele geodynamische Prozesse erkennen. Ich sollte an dieser Stelle am besten das Wort an den Geophysiker übergeben. An der Ludwig-Maximilians-Universität

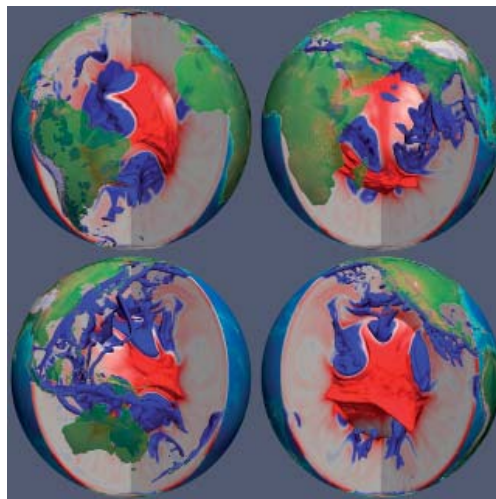


Abb. 9: Numerisches Erdmodell. Aufsteigendes heißes Material des tiefen Erdmantels in Rot, absinkendes kaltes Material in Blau.

München arbeitet man an einem bereits sehr realistischen Modell der Physik unserer Erde, das in Abbildung 9 gezeigt ist.

Das Aufsteigen und Abtauchen, in der Abbildung in Rot bzw. Blau, von Mantelmaterial ist Teil eines gigantischen Wärmeaustauschsystems zwischen dem sehr heißen Erdkern und der kalten Erdoberfläche. Die Temperaturverteilung lässt sich mit Hilfe der seismischen Tomographie ableiten, d.h. mit Hilfe der Analyse der Ausbreitung der Erdbebenwellen im Erdkörper. Doch will man mit dem Geoid der Satellitenmission GOCE dieses numerische Modell überprüfen, so muss auch erforscht werden, wie sich Mantelmaterial unter den Druck- und Temperaturbedingungen tief im Erdmantel verhält. International führend auf diesem Gebiet ist das Geoinstitut der Universität Bayreuth, das eng mit der Bayerischen Akademie der Wissenschaften verbunden ist.



Abb. 10: Multianvilpresse des Bayerischen Geoinstituts an der Universität Bayreuth. Laborproben können mit dieser Einrichtung Drücken und Temperaturen wie im Erdmantel unterzogen werden.

So entsteht in kleinen Schritten aus der Synergie von numerischen Modellrechnungen, Laborexperimenten, einem globalen Netz von Seismometern und Satellitengravimetrie von GOCE ein Bild über die Prozesse des Erdinneren.

Weit direkter ist die Rolle der Erdfigur bei der Erforschung der Physik unserer Ozeane. Die Geoidoberfläche entspricht dem hypothetischen Ruhezustand der Ozeane. Seit ca. 20 Jahren wird die tatsächliche Meeresspiegeloberfläche von einer ganzen Serie von Forschungssatelliten zentimetergenau abgetastet und abgebildet. Nur so wissen wir, dass der Meeresspiegel im globalen Mittel etwa 3 mm/Jahr steigt; dies sind immerhin 30 cm pro Jahrhundert. Es zeigt sich aber auch, dass der Anstieg von Region zu Region stark variiert.

Vergleichen wir den tatsächlichen Meeresspiegel mit dem Geoid, so ergibt die Höhendifferenz die Ozeantopographie. Der Begriff Topographie ist mit Sorgfalt gewählt in seiner Analogie zur Topographie auf

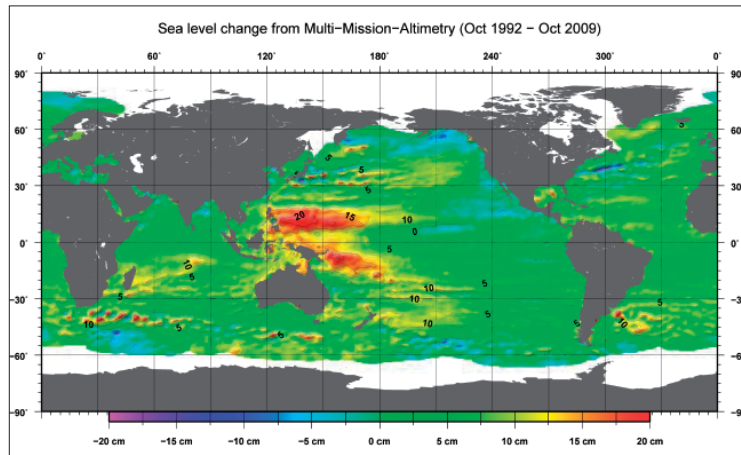


Abb. 11: Meeresspiegelanstieg (bzw. -abnahme) im Zeitraum Oktober 1992 bis Oktober 2009.

dem Land. Es sind dies die Erhebungen bzw. Absenkungen der tatsächlichen Meeresoberfläche bezüglich des Geoids. Allerdings erreicht diese Topographie nur maximale Erhebungen und Senken von ein bis zwei Metern. Die Ozeantopographie ist ein Abbild der Meereszirkulation. Die Wassermassen bewegen sich entlang der Höhenlinien dieser Topographie, auf dem nördlichen Halbrund im Uhrzeigersinn, südlich des Äquators im Gegenuhrzeigersinn. Aus der Hangneigung dieser Topographie lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit errechnen.

Unschwer ist das Zirkulationssystem des Golfstroms im Nordatlantik zu erkennen, der Kuroshio oder Japanstrom im Pazifik und der sehr

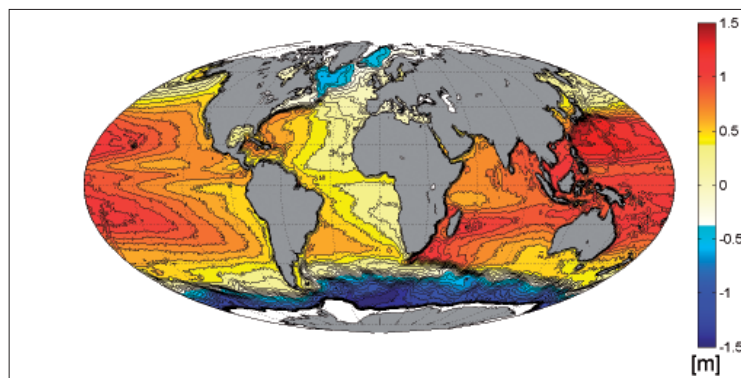


Abb. 12: Meerestopographie aus GOCE in Kombination mit Satellitenaltimetrie (in Meter). Ein Abbild der Ozeanzirkulationssysteme.

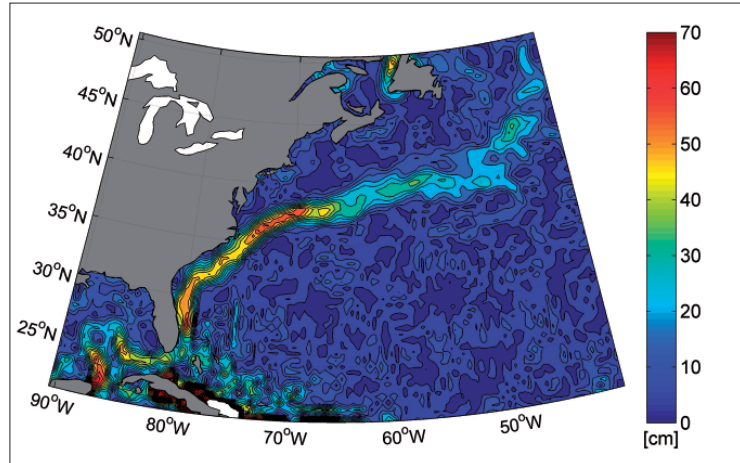


Abb. 13: Strömungsgeschwindigkeiten (in cm/s) im Nordatlantik, ebenfalls abgeleitet aus GOCE und Satellitenaltimetrie.

turbulente Zirkumpolarstrom, der ungehindert von kontinentalen Barrieren große Mengen sehr kalten Wassers um den Erdball transportiert. Erstmals sind diese Systeme nun direkt global und detailgenau messbar. Circa 30 bis 50 % der Wärme, die aus den Äquatorregionen polwärts in unsere Breiten transportiert wird und die unser Klima so angenehm macht, wird von den Ozeanen befördert, der andere Teil in der Atmosphäre. Allein schon die Größe der Unsicherheit, 30 % oder

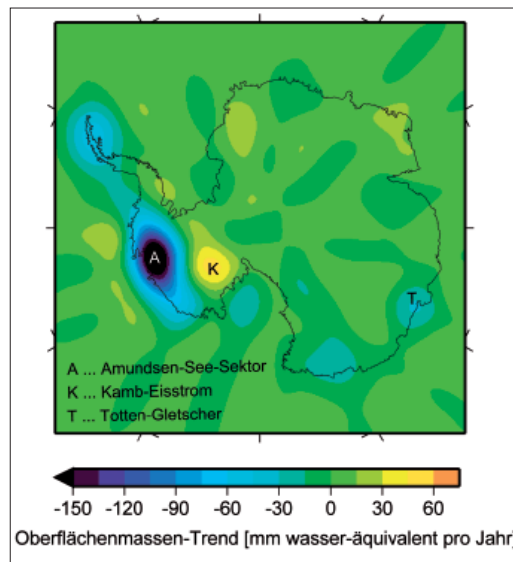


Abb. 14: Eismassenbilanz in der Antarktis aus Satelliten-gravimetrie mit der Mission GRACE. Der Nettoverlust von 108 Gt/Jahr entspricht einem Meeresspiegelanstieg von 0,3 mm/Jahr.

50 %, mag überraschend sein. Jede Veränderung dieses Wärmeleitsystems hat Auswirkung auf das Klimagleichgewicht. Das nun mit der Satellitenmission GOCE entstehende Abbild der Erdfigur wird zu sehr viel genaueren Aussagen über Massen- und Wärmetransport in den Weltmeeren führen.

Kann man in Anbetracht der erreichten Genauigkeiten überhaupt von einem Geoid sprechen? Ist die Erdfigur nicht durch das Auf und Ab der Gezeiten, den Meeresspiegelanstieg, die Atmosphärenmassen oder das Abschmelzen der großen Eisschilde ständigen Veränderungen unterworfen? All diese Prozesse gilt es tatsächlich zu berücksichtigen; sie sind aber messbar. Parallel zu GOCE konzentriert sich eine amerikanisch-deutsche Schwestermission auf die Zeitabhängigkeit der Erdfigur. Erstmals gelingt es mit ihr, direkt das Gewicht von Eismassenverlusten und -zuwüchsen in der Antarktis mit Hilfe von Gravitationsmessungen aus dem Weltraum zu bilanzieren.

In der Akademie versuchen die Wissenschaftler der Kommission für Erdmessung und Glaziologie dieses Prinzip – mit Schweremessungen auf dem Eis – direkt auf den viel kleineren Vernagtferner in den Alpen zu übertragen: die unmittelbare Gewichtsbestimmung des Eismassenverlustes.

Abb. 15: Wissenschaftliche Mitarbeiter der Kommission für Erdmessung und Glaziologie der BAdW führen gravimetrische Messungen auf dem Vernagtferner durch. Ziel ist die Massenbilanzierung.



Vor 250 Jahren ging es in der Diskussion um die Figur der Erde, um ihre Abplattung. Durch eine erstaunliche Entwicklung werden heute aus der Erdgestalt sehr kleine Variationen des Gravitationsfelds der Erde in Raum und Zeit erfassbar. Ist damit der Grenzbereich dieser Entwicklung bereits erreicht? Denkbar wäre – ich meine sogar, es ist wahrscheinlich – dass sich in Zukunft das Geoid mit sehr genauen Uhren vermessen lässt.

Im Gedankengebäude der allgemeinen Relativitätstheorie ticken auf dem Geoid alle Uhren gleich. Die beiden Grundelemente jeder Uhr sind ein gleichmäßig periodischer Vorgang und ein Zählwerk, das die Anzahl der Schwingungen zuverlässig addiert. Man denke an eine

Pendeluhr. Die Schwingung des Pendels ist der periodische Vorgang. Mit einem Räderwerk erfolgt die Zählung, die auf einem Ziffernblatt angezeigt wird. Bei den genauesten aller heute verfügbaren Chronometer, den optischen Uhren, stellt die sehr große Anzahl von Schwingungen extrem hohe Anforderungen an die zuverlässige Zählung. Professor Hänsch schuf mit seiner großartigen Entwicklung eines optischen Kamms das für derartige Uhren notwendige Zählwerk. Man könnte sich nun vorstellen, mit optischen Uhren den Meeresspiegel über Kontinente hinweg zu vergleichen, einen gemeinsamen Bezug herzustellen. So ließen sich die über Jahrzehnte durchgeführten Pegelmessungen des Meeresspiegels, zum Beispiel in Sydney, auf Honolulu oder in Brest vergleichbar machen. Bereits heute werden die Zeiten der nationalen Frequenzstandards, d.h. der Cäsiumuhren oder Wasserstoffmaser, die unsere offizielle Zeit generieren, auf das Geoid reduziert. Ein Höhenunterschied von einem Zentimeter zwischen Australien und Europa entspräche einer Differenz von einer von 10^{18} Schwingungen pro Sekunde.

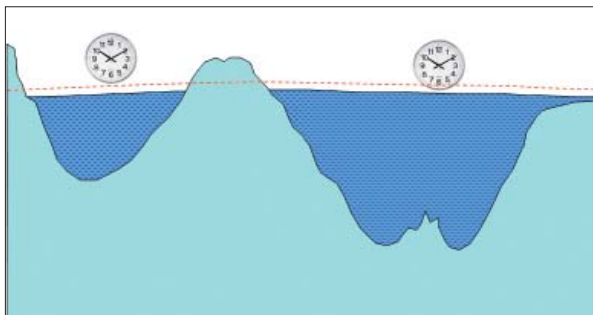


Abb. 16: Auf dem Geoid ticken alle Uhren gleich. Ein Höhenunterschied von 1 cm ergäbe einen relativistischen Effekt von 1 aus 10^{18} Schwingungen pro Sekunde.

Die Erdfigur ließe sich so zukünftig zentimetergenau mit Uhren bestimmen. Natürlich müsste das nicht ganz triviale Problem gelöst werden, die über den Globus verteilten Uhren gleich zu stellen. Doch auch dieses Problem scheint lösbar, und zwar mit Laserimpulsen, die via Satelliten die Uhren vergleichen.

Cassini de Thury nahm sich 1761 vor, „diejenigen geographischen Finsternisse zu vertreiben, die ... über diesen Theil Deutschlands herrschen sollen“. Die Akademie übertrug Teile der notwendigen geodätischen und astronomischen Arbeiten einem Mitarbeiter von Cassini, dem französischen Ingenieurgeographen Saint Michèl. Unzufriedenheit mit dem Ergebnis seiner Arbeiten führte dazu, dass er von dieser Aufgabe nach einigen Jahren entbunden wurde. Es entstanden insgesamt nur zwei Kartenblätter. Fünfzig Jahre später, so schreibt 1859 Carl Friedrich Philipp von Martius, gab jedoch der große Mathematiker Laplace vor dem französischen Senat „dem bayerischen Katastral-Mess-

Systeme, als dem vorzüglichsten, seine unumwundene Zustimmung und wies auf die Nachahmung dieses teutonischen Instituts hin“.

Es war ein hervorragendes Kartenwerk von Bayern entstanden. Dieses Werk war die große und viel beachtete Leistung der Akademiemitglieder Ulrich Schiegg (1752–1810; Akademiemitglied 1803) und insbesondere Johann Georg von Soldner (1776–1833; Akademiemitglied 1813).



Abb. 17: Die Akademiemitglieder Ulrich Schiegg (1752–1810) und Johann Georg von Soldner (1776–1833) schufen ein hervorragendes Kartenwerk von Bayern.

In der Geographical Society zu London wurde es 1841 als das perfekte jemals in Angriff genommene katastrale Kartenwerk bezeichnet. Bayern war eine ernst zu nehmende Größe geworden im Ringen um die wahre Figur der Erde.

Danksagung: Herzlicher Dank ergeht an Dr. Cornelia Meyer-Stoll, Kommission für Sozial- und Wirtschaftsgeschichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, und Prof. Dr. Hans-Peter Bunge, Ludwig-Maximilians-Universität, für wichtige Hinweise, sowie an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München.

Bildnachweise

Abb. 1 und 2: Chandrasekhar, S.: Ellipsoidal Figures of Equilibrium, Yale University Press, New Haven & London, 1969.

Abb. 3: Gravur nach R. de Tournières, 1737.

Abb. 4: Cox, C., B.F. Chao: Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998, *Science* 297, 831–833, 2002.

Abb. 5, 6 und 7: European Space Agency.

Abb. 8, 12 und 13: Arbeiten des Instituts für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München.

Abb. 9: H.-P. Bunge, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Abb. 10: H. Keppler, Universität Bayreuth.

Abb. 11: W. Bosch, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut.

Abb. 14: M. Horwath, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München.

Abb. 17: Abb. links: Bayerische Vermessungsverwaltung (www.vermessung.bayern.de); Abb. rechts: Geist und Gestalt, Band III, Tafel 72. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1959.

Literaturnachweise

Adee, D.: Newton's Principia. The Mathematical Principles of Natural Philosophy. New York 1846.

Chandrasekhar, S.: Ellipsoidal Figures of Equilibrium. Yale University Press, New Haven & London 1969.

Chao, B.F.: Earth's oblateness and its temporal variations. *C.R. Geoscience* 338, 1123–1129, 2006.

Cox, C., B.F. Chao: Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. *Science* 297, 831–833, 2002.

Finsterwalder, R.: Zur Entwicklung der bayerischen Kartographie von ihren Anfängen bis zum Beginn der amtlichen Landesaufnahme, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 108. München 1967.

Gauss, C.F.: Werke, 9. Band, Abschnitt 20, 48–50, Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Teubner, Leipzig 1903.

Habermeyer, A.: Die topographische Landesaufnahme von Bayern im Wandel der Zeit. Wittwer, Stuttgart 1993.

Kneißl, M.: Geodäsie, in: Geist und Gestalt, 2. Band, 53–61. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1959.

King-Hele, D.G.: A tapestry of orbits. Cambridge University Press 1992.

- Linprun, D. von: Versuche einer Verbesserung der Landkarte von Baiern, Abhandlungen der Churfürstlich-baierischen Akademie der Wissenschaften, 2. Band. München 1764.
- Listing, J.B.: Ueber unsere jetzige Kenntnis der Gestalt und Grösse der Erde, Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften und der Georg-August-Universität zu Göttingen, No. 3, 33–98, 1873.
- Martius, C.F.Ph. von: Erinnerung an Mitglieder der mathematisch-physikalischen Classe der K. Bayerischen Akademie der Wissenschaften. München 1859.
- Merson, R.H., D.G. King-Hele: Use of artificial satellites to explore the earth's gravitational field: results from Sputnik 2 (1957_β). *Nature*, 182, 640–641, 1958.
- Todhunter, I.: *A History of the Mathematical Theories of Attraction and the Figure of the Earth*, Vol. I und II. Macmillan and Co., 1873, Elibron Classics, London 2005.
- Torge, W.: *Geschichte der Geodäsie in Deutschland*. De Gruyter, Berlin / New York 2007.
- Willoweit, D. (Hrsg.): *Denker, Forscher und Entdecker. Eine Geschichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in historischen Portraits*. C.H.Beck, München 2009.