

Reinhard Rummel

Fünzig Jahre Sputnik und fünfzig Jahre Vermessung des Gravitationsfelds der Erde mit Satelliten

Issac Newton stellte mit seinem universellen Gravitationsgesetz die geniale gedankliche Verbindung her zwischen dem freien Fall eines Apfels vom Baum und der Bewegung eines Satelliten um die Erde, vgl. Abb. 1.

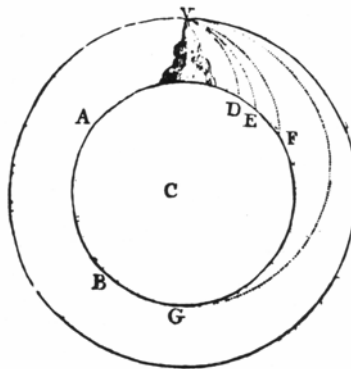


Abb. 1: aus Newtons „*De mundi systemate*“ (1715)

Er wies uns damit den Weg, die Bewegung eines künstlichen Satelliten um die Erde als freien Fall einer Testmasse im Gravitationsfeld der Erde zu interpretieren. Wäre die Erde eine homogene Kugel, so wäre die Bahn des Satelliten eine perfekte Ellipse, wie sie mit den Keplerschen Gesetzen mathematisch beschrieben wird. In einem der beiden Brennpunkte der Ellipse befände sich das Zentrum der Erdkugel. Die Bahnebene der Ellipse stünde bezüglich des Fixsternhimmels unveränderlich im Raum. Betrachtet man eine abgeplattete Kugel – eine Form, die der Erdfigur sehr nahe kommt – so vollführt die Bahnebene eine langsame Kreiselbewegung im Raum; man spricht von der Präzession der Bahnebene. Aus der geschlossenen Ellipse

wird nun eine sich um die Erde „windende“ Spirale. Für die wirkliche Erde, mit einer Vielfalt von Dichteveriationen im Inneren und an der Oberfläche des Erdkörpers, ist diese Spiralbewegung überlagert mit einem Gravitations-signal. Der Satellitenbewegung ist eine kontinuierliche Abfolge von kleinen oszillierenden Beschleunigungen und Verzögerungen aufgeprägt. Diese drei Fälle sind in Abb. 2 dargestellt.

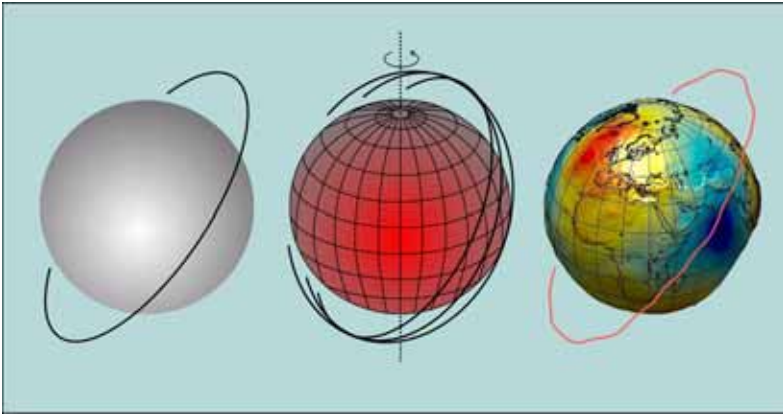


Abb. 2: *Bahnbewegung um Kugel, abgeplattete Erde und wirkliche Erde*

Der Start von Sputnik 1 am 4. Oktober 1957 bedeutete für die Geodäsie eine Zeitenwende. Erstmals konnte man eine wirklich globale und räumliche Vermessung der Erde ins Auge fassen. Bereits mit den Radiosignalen der Satelliten Sputnik-1 und Sputnik-2 gelang eine sehr genaue Bestimmung der Erdabplattung. In seinem Buch „A tapestry of orbits“ (1992) beschreibt King-Hele, einer der Pioniere dieser ersten Jahre der Satellitengeodäsie, welcher tiefgreifender Einschnitt dies für die klassische Erdmessung war.

Bis dahin beruhten die Ergebnisse der Erdmessung auf den berühmten Gradmessungen des 18. Jahrhunderts, gefolgt von der durch General Johann Jacob Baeyer 1861 (Baeyer, 1861) initiierten Verknüpfung der Gradmessungen zur mitteleuropäischen, dann europäischen und schließlich internationalen Bestimmung der Erdfigur. Es sei erwähnt, dass zur Realisierung dieses Vorhabens unter anderem das berühmte Preußische Geodätische Institut auf dem Telegrafenberg in Potsdam gegründet wurde. Es gelangte unter Friedrich Robert Helmert zu Weltruhm. Nach dem 2. Weltkrieg ging aus diesem Institut das Zentralinstitut für Physik der Erde (ZIPE) hervor, dessen Nachfolgeeinrichtung das heutige GeoForschungsZentrum (GFZ) ist.

Doch zurück zur Vermessung der Erde. Ein wesentlicher Parameter der Bestimmung der Erdfigur ist die Abplattung des bestanschließenden Ellipsoids. Die internationale Erdmessung ermittelte mit den Methoden der Triangulation und astronomischen Ortsbestimmung

den Wert $f = 1:297$, wobei $f = (a-b)/a$ mit der großen Halbachse a und der kleinen Halbachse b . Die beiden ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik-1 und Sputnik-2 ermöglichten die Bestimmung der Erdabplattung aus der Messung der bereits erläuterten Präzessionsbewegung, d.h. der Kreiselbewegung der Bahnebene im Raum. Das von King-Hele ermittelte Abplattungsglied J_2 der Reihendarstellung war $J_2 = 1084 \cdot 10^{-6}$ und die daraus berechnete geometrische Abplattung ergab $f = 1:298$. Dieser Wert hat sich bis heute nur unwesentlich verbessern lassen; er ist nun $1/298.257$, vgl. (King-Hele, 1992, S. 39).

Auch noch heute wird dieser Ansatz, leicht modifiziert und wesentlich genauer eingesetzt, nun aber zur Bestimmung der zeitlichen Veränderung der Erdabplattung. Dazu werden primär die passiven, d.h. nur mit Laserreflektoren ausgestatteten Satelliten LAGEOS-1 und -2 verwendet. Aus der Laufzeitmessung von Laserpulsen lässt sich deren Bahn zentimetergenau rekonstruieren. Die Messreihen von 1979 bis 2001 zeigen eine konstante Abnahme der Erdabplattung von $2.9 \cdot 10^{-11}$, sehr wahrscheinlich verursacht durch den langsamen isostatischen Massenausgleich im Erdmantel als Reaktion auf das relativ schnelle Abschmelzen der Eisschilde in den polnahen Gebieten nach der letzten Eiszeit. Nur in den zurückliegenden sechs Jahren zeigte sich eine Umkehr dieses Trends. Sie muss mit größeren Massenverschiebungen im Erdsystem zusammenhängen und ist daher sehr wichtig zum Verständnis der viel diskutierten Klimaänderungen. Denkbare Ursachen wären Abschmelzprozesse der Eisschilde, Veränderungen der Meereszirkulation, atmosphärische Massenverlagerungen, Verlagerungen im globalen Wasserkreislauf oder aber Prozesse im Erdkern. Abschließende Erklärungen stehen noch aus, siehe (Cox & Chao, 2002; Dickey u.a., 2002; Cazenave & Nerem, 2002).

Soviel zur Bestimmung der Erdabplattung und ihrer zeitlichen Veränderungen, die mit Sputnik ihren Anfang nahm. Weit langwieriger gestaltete sich die „Entzifferung des Gravitationskodes“, d.h. die globale Bestimmung der Variationen des Gravitationsfeldes der Erde aus Messungen der Bahnunregelmäßigkeiten. Bis zum Jahr 2000 musste sich die Wissenschaft mit einem komplizierten Flickwerk begnügen. Die von einer großen Anzahl von Observatorien durchgeführten Messreihen zu sehr unterschiedlichen Satelliten

wurden in einem aufwändigen Rechenprozess kombiniert. Es entstanden relativ realistische Modelle der Geoidfigur und der räumlichen Variationen der Erdanziehung; Beispiele sind das amerikanische Modell EGM96 (Lemoine u.a., 1998) und das deutsch-französische Model GRIM5 (Gruber u.a., 2000).

Mit dem erfolgreichen Start des vom GeoForschungsZentrum auf dem Telegrafenberg initiierten deutschen Kleinsatelliten CHAMP begann 2000 eine neue Ära in der Satellitengravimetrie. CHAMP ist einerseits mit einem GPS-Empfänger geodätischer Präzision und andererseits mit einem sehr empfindlichen Beschleunigungsmesser ausgestattet. Der GPS-Empfänger ermöglicht die kontinuierliche und dreidimensionale Bahnverfolgung mit Zentimetergenauigkeit. CHAMP umkreist die Erde in einer Höhe von nur 450 km, d.h. sehr nahe an den anziehenden Massen des Erdsystems, vgl. Abb. 3.

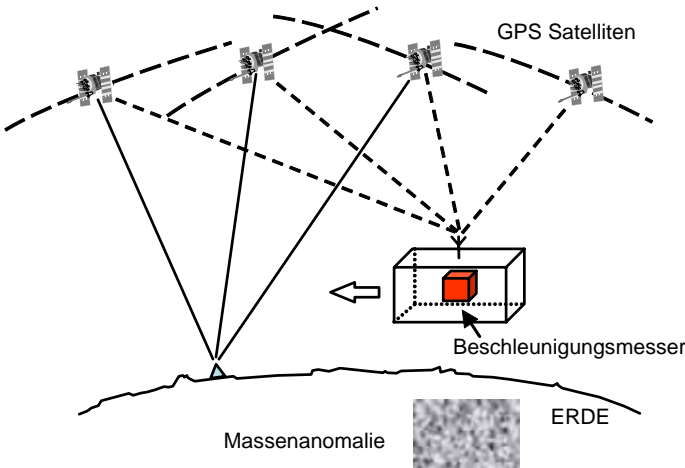


Abb. 3: Prinzip CHAMP: GPS und Akzelerometer

Die GPS-Satelliten in einer Höhe von ca. 20000 km sind in ihrer Bahnbewegung von den Massenunregelmäßigkeiten der Erde weitgehend unbeeinflusst. Damit lässt sich aus großer Höhe mit den Satelliten des Global Positioning Systems das Gravitationssignal des erdnahen CHAMP perfekt abtasten. Der Beschleunigungsmesser ist im Zentrum des Satelliten gelagert und ermöglicht die Messung der auf die Satellitenhülle einwirkenden Störeinflüsse der Restatmosphäre. Somit lassen sich Störeinflüsse der Atmosphäre von den rein gravitativen Bahnsignalen trennen. Mit den Daten nur dieses einen Satelliten

entstanden globale Schwerefeldmodelle einer vollkommen neuen Qualität, z.B. (Reigber u.a., 2002) oder (Gerlach, u.a., 2003).

Dennoch bleibt auch bei diesem Ansatz das aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz folgende Hindernis jeder Form von Gravitationsfeldbestimmung mit Satelliten erhalten: Die Anziehungswirkung von Massen des Erdsystems klingt mit dem Quadrat des Abstands ab. Daher entstanden schon in den siebziger Jahren Überlegungen zu differentiellen Verfahren, (Williamstown Study, 1969), die sich jedoch erst in neuester Zeit technologisch umsetzen lassen. Der Grundgedanke ist dabei, die gravitative Relativbewegung zwischen Testmassen im Orbit zu messen und damit über differentielle Messungen das quadratische Abklingverhalten wenigstens teilweise zu kompensieren. Das erste Experiment dieser Art ist die amerikanische Satellitenmission GRACE, an der das GFZ maßgeblich beteiligt ist. Zwei CHAMP-artige Satelliten, ausgestattet mit GPS und Beschleunigungsmesser, folgen einander in der gleichen Umlaufbahn in einem Abstand von circa 200 km, vgl. Abb. 4.

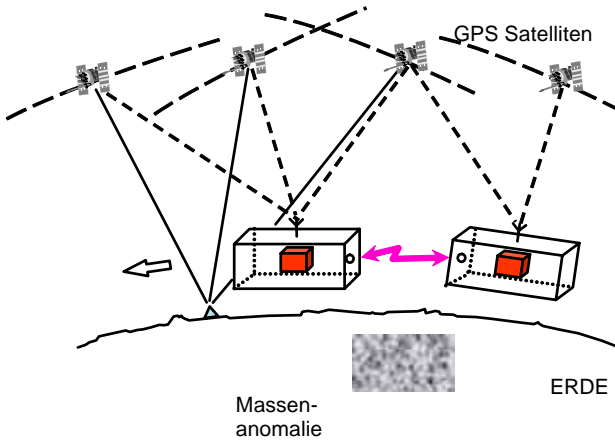


Abb. 4: Prinzip GRACE: Abstandsmessung zwischen zwei sich folgenden Satelliten

Mit einem Mikrowellenverfahren werden die Variationen des Abstands mikrometergenau gemessen. Dieser Ansatz entspricht der Messung der Gravitationsdifferenz zweier im Abstand von 200 km im Gravitationsfeld der Erde frei fallender Massen. Diese äußerst empfindlichen Messungen gestatten erstmals die Bestimmung der zeitlichen Veränderungen, nicht nur der Abplattung, sondern des ganzen Schwerefeldes der Erde. Sie werden zum Beispiel

hervorgerufen durch die jahreszeitlichen Variationen im globalen Wasserkreislauf oder durch das Abschmelzen der polaren Eiskappen. Sie sind daher von großer Bedeutung für die Erforschung der globalen, klimabedingten Veränderungen im Erdsystem, vgl. zum Beispiel (Chen u.a., 2005; Velicogna u.a., 2005; Chambers, 2006).

Ein zu GRACE alternativer Ansatz ist die Gravitationsradiometrie im Satelliten. Sie wird mit dem Start der Mission GOCE der europäischen Raumfahrtagentur ESA im Frühjahr 2008 erstmals erprobt werden, siehe (ESA, 1999 und Johannessen u.a., 2003) und Abb. 5.



Abb. 5: GOCE im Testlabor (Dank an ESA)

Dabei werden sechs Beschleunigungsmesser zu einem Instrument vereinigt. Im Abstand von 50 cm und paarweise entlang von drei orthogonalen Achsen angeordnet, messen sie sehr kleine Differenzen der Gravitationsanziehung der Erde. Die maximal auftretenden Gravitationsbeschleunigungen betragen weniger als ein Millionstel der Anziehung auf der Erde. Ihre genaue Messung erfolgt mit einer äußerst empfindlichen Messapparatur. Die Nutzung dieser differentiellen Messgrößen erfordert eine extrem niedrige Erdumlaufbahn, eine genaue Kontrolle der Satellitenbewegung und ein starres und temperaturkonstantes Satellitengehäuse. Die Erwartung ist, mit dieser Mission die Geoidoberfläche, d.h. die geometrische Form der Niveaulfläche (Horizontalfläche) auf Meereshöhe zentimetergenau zu vermessen. Die wissenschaft-

lichen Anwendungen reichen von Untersuchungen der globalen Ozeanzirkulation, über die Erfassung der Dynamik der Lithosphäre und des oberen Erdmantels, zu Analysen der Veränderung des Meeresspiegels und der Vereinheitlichung der weltweiten geodätischen Höhensysteme.

Mit dem Start von Sputnik-1 1957 trat die Menschheit in ein neues technologisches Zeitalter ein. Die moderne Kosmologie, Solarphysik, Planetologie und Erdsystemforschung wären ohne Satelliten nicht mehr denkbar. Die Geodäsie wurde mit den Raumverfahren wirklich global und dreidimensional. Mit den technischen Fortschritten der jüngsten Jahre eroberte die Geodäsie zudem die Koordinate „Zeit“ als vierte Dimension. Erdgestalt, Gravitationsfeld und Rotation der Erde wurden in ihrer räumlichen und zeitlichen Dynamik erfassbar; sie sind heute wichtige Indikatoren bei der Erforschung des Erdsystems.

Literatur

- Baeyer, J.J. (1861): *Über die Größe und Figur der Erde*. Georg Reiner Verlag, Berlin.
- Cazenave, A., R.S. Nerem (2002): *Redistributing Earth's Mass*. Science, 297, 783-784.
- Chambers, D.P. (2006): *Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry*. Journal of Geophysical Research, Vol. 111, C03010, doi: 10.1029/2005JC002914.
- Chen, J.L., M. Rodell, C.R. Eilson and J.S. Famiglietti (2005): *Low degree spherical harmonic influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage estimates*. Geophysical Research Letters, Vol. 32, L14405, doi: 10.1029/2005GL022964.
- Cox, C.M., B.F. Chao (2002): *Detection of a large-scale Mass Redistribution in the Terrestrial System since 1998*. Science, 297, 831.
- Dickey, J.O., S.L. Marcus, O. de Viron, I. Fukumori (2002): *Recent Earth Oblateness Variations: Unraveling Climate and Postglacial Rebound Effects*. Science, 298, 1975-1977.
- ESA (1999): *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission*. Reports for Mission Selection, SP-1233 (1), ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, (web site <http://www.esa.int/livingplanet/goce>).
- Gerlach, C., L. Földvary, D. Svehla, Th. Gruber, M. Wermuth, N. Sneeuw, B. Fromm-knecht, H. Oberndorfer, Th. Peters, M. Rothacher, R. Rummel, P. Steigenberger (2003): *A CHAMP-only gravity field model from kinematic orbits using the energy integral*. Geophysical Research Letters 30 (20).
- Gruber, Th., A. Bode, Ch. Reigber, P. Schwintzer, G. Balmino, R. Biancale, J.-M. Lemoine (2000): *GRIM5-C1. Combination solution of the global gravity field to degree and order 120*, Geophysical Research Letters, Vol. 27, No. 24, 4005-4008.

- Johannessen, J.A., G. Balmino, C. LeProvost, R. Rummel, R. Sabadini, H. Sünkel, C.C. Tscherning, P. Visser, P. Woodworth, C.H. Hughes, P. Legrand, N. Sneeuw, F. Perosanz, M. Aguirre-Martinez, H. Rebhan and M.R. Drinkwater (2003): *The European gravity field and steady-state ocean circulation explorer satellite mission: its impact on geophysics*. Surveys in Geophysics 24: 339-386.
- King-Hele, D. (1992): *A Tapestry of Orbits*. Cambridge Univ. Press.
- Lemoine, F.G., S.C. Kenyon, J.K. Factor, R.G. Trimmer, N.K. Pavlis, D.S. Chinn, C.M. Cox, S.M. Klosko, S.B. Luthcke, M.H. Torrence, Y.M. Wang, R.G. Williamson, E.C. Pavlis, R.H. Rapp and T.R. Olson (1998): *The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*.
- Reigber, C., G. Balmino, P. Schwintzer, R. Biancale, A. Bode, J.M. Lemoine, R. Konig, S. Loyer, H. Neumayer, J.C. Marty, F. Barthelmes, F. Perosanz, S.Y. Zhu (2002): *A high quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S)*. Geophysical Research Letters 29 (14).
- Velicogna, I., J. Wahr, E. Hanna, P. Huybrechts (2005): *Short term mass variability in Greenland, from GRACE*. Geophysical Research Letters, Vol. 32, L05501, doi: 10.1029/2004GL021948.
- Williamstown Study (1969): *The Terrestrial Environment Solid-Earth and Ocean Physics*. Application of Space and Astronomic Techniques, Cambridge.