

Zum Geoid und seiner Bestimmung

von Joachim Höpfner, Potsdam

- 19.Jh. Die Gradmessungen haben gezeigt, daß die mathematische Figur der Erde nur in erster Näherung durch ein Rotationsellipsoid beschrieben werden kann.
- 1828 **C. F. Gauß** deutete die mathematische Oberfläche der Erde als diejenige Fläche, welche überall die Richtung der Schwere senkrecht schneidet und von der die Oberfläche des Weltmeeres einen Teil ausmacht.
- 1837 **F. W. Bessel** äußerte den Gedanken, man könne sich die durch die Meeresfläche dargestellte Niveaulfläche auch in die Kontinente fortgesetzt denken, wenn man sich ein Netz wassergefüllter Kanäle vorstellt, die mit dem Meer in Verbindung stehen.
- 1849 **G. G. Stokes** veröffentlichte den Zusammenhang zwischen Schwereanomalien, die sich auf das Geoid und ein Niveausphäroid beziehen.
- 1861 **J. J. Baeyer** unterbreitete dem Preußischen Kriegsministerium die Schrift "Entwurf zu einer mitteleuropäischen Gradmessung".
- 1862 **Baeyer** publizierte das ausführliche wissenschaftliche Dokument "Über die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung".
Eröffnungs-Konferenz der Mitteleuropäischen Gradmessung in Berlin
- 1864 1. Allgem. Konferenz der Mitteleuropäischen Gradmessung in Berlin. Es gab die Empfehlung, die Lokaleinflüsse an astronomischen Hauptstationen zu untersuchen.
- 1867 2. Allgem. Konferenz der Europäischen Gradmessung in Berlin. Es wurde eine Kommission zur systematischen Untersuchung der lokalen Lotabweichungen an Hauptdreieckspunkten eingesetzt.
- 1868 **Villarceau**, Astronom an der Pariser Sternwarte, veröffentlichte eine erste Theorie über die Bestimmung der wahren Erdgestalt mittels trigonometrischer Messungen und geometrischer Nivellements.
- 1870 Gründung des Königlich-Preußischen Geodätischen Instituts in Berlin, ab April 1892 auf dem Potsdamer Telegrafenberg
- 1871 **Villarceau** veröffentlichte eine zweite Methode, wie aus astronomisch-geodätischer Koordinaten von in Nord-Süd- und Ost-West-Profilen gelegenen Punkten Geoidstücke für kleine Gebiete bestimmt werden können.
- 1872 **J. B. Listing** machte darauf aufmerksam, daß man von den zeitlichen Veränderungen des Meeresniveaus abstrahieren muß. Er nannte die von **Gauß** und **Bessel** definierte mathematische Erdfigur "Geoid".
- Mitte 19.Jh. Es gibt noch keine rechte Vorstellung von der Größe der Geoidundulationen. Synthetische Untersuchungen ergaben Beträge von mehr als 1000 m.
- 1874 Auf der 4. Allgem. Konferenz der Europäischen Gradmessung in Dresden wurde das Problem der Geoidbestimmung auf geodätisch-astronomischem Wege zum ersten Mal ernsthaft diskutiert. Es wurde vorgeschlagen, astronomisch-geodätische Messungen durchzuführen und zur Auswertung an **Villarceau** zu senden.
- 1878 **H. Bruns** beschäftigte sich ausführlich mit den physikalischen Grundlagen der Erdfigur und beschrieb eine strenge Lösung der Erdmessungsaufgabe. Dabei wies er darauf hin, daß wahre Meereshöhen aus dem geometrischen Nivellement nur in Verbindung mit Schweremessungen abgeleitet werden können.
- 1880 **F. R. Helmert** gab eine Methode an, Geoidprofile auf graphisch-rechnerische Weise aus Lotabweichungen abzuleiten (astronomisches Nivellement).
- 1884 **Helmert** widmete im 2. Band "Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie" ein breites Kapitel dem Einfluß von Massen auf die Niveaulflächen in der Nähe der Erdoberfläche.
- ab 1886 Bei den Methoden von **Villarceau** und **Helmert** sind engmaschige astronomisch-geodätische Netze zu bestimmen. Anfänglich konnte aber die Anlage des Netzes nur nach einem großräumigen Plan erfolgen. Ausnahmen waren systematische

- Lotabweichungsuntersuchungen in der Umgebung von Moskau (von **G. Schweizer**), in der Schweiz (1886) und im Harz (von **Baeyer**, 1865, von **L. Krüger**, 1888 und von **A. Galle**, 1914).
- 1934 **R. A. Hirvonen** benutzte erstmals die Formel von **Stokes** zur Berechnung von Geoidundulationen aus Schwereanomalien.
- nach 1945 **G. Bomford** wird mit der Leitung der SSG "Bestimmung des Geoids in Europa aus den relativen Lotabweichungen" beauftragt.
- 1949 **L. Tanni** leitete die erste europäische Geoidkarte aus Schwereanomalien ab.
- 2.H.
20.Jh. In der Landesvermessung dienen vor allem Schweremessungen mit Gravimetern zur regionalen Geoidbestimmung. Das Verfahren ist aber viel zu aufwändig, um es für eine globale Geoidbestimmung zu benutzen.
- 4.10.1957 Start des ersten künstlichen sowjetischen Erdsatelliten Sputnik 1; Beginn von Satellitenbeobachtungen.
- Anfang
1960er Die ersten bedeutsamen Ergebnisse aus Satellitenbeobachtungen sind: Bestimmung der Erdabplattung mit bis dahin unerreichter Genauigkeit und Entdeckung der sogenannten Birnenform der Erde, d.h., es wurde festgestellt, daß das Geoid der Erde am Nordpol eine Beule und am Südpol eine Delle hat, wodurch mit etwa +15 m im Norden und mit etwa -15 m im Süden eine Nord-Süd-Asymmetrie der Erdfigur auftritt.
- 1968 **I. Fischer** und **M. Slutsky** bestimmen ein Geoid aus dem Zusammenschluß von astrogeodätischen Systemen mit dem mittlerem Referenzellipsoid, das die Parameter $a = 6378150$ m und $f = 1 : 298,3$ hat.
- 1969 Bildung des Zentralinstituts für Physik der Erde (ZIPE) aus dem Geodätischen Institut Potsdam, dem Geomagnetischen Institut Potsdam, dem Institut für Bodendynamik und Erdbebenforschung Jena und dem Geotektonischen Institut Berlin
- 1969/1970 Das Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) veröffentlicht das Geoid 1969 Smithsonian Standard Earth II, das aus routinemäßig und simultan durchgeführten Satellitenbeobachtungen, Beobachtungen von Tiefensondierungen und terrestrischen Schweremessungen von **E. M. Gaposchkin** und **K. Lambeck** abgeleitet wurde.
- Wie globale Geoidbestimmungen zeigen, erreichen die Abweichungen des Geoids von einem Referenzellipsoid regional bis ± 100 m.

Neue Ära Seit Beginn der Satellitenzeit wird die Vermessung des globalen Schwerfeldes der Erde durch die Analyse von Messungen der Satellitenbahnstörungen, die von Unregelmäßigkeiten der Erdfigur und der Dichte- und Massenverteilungen im Erdinnern auf Umlaufbahnen herrühren, kontinuierlich durchgeführt und ständig verbessert. Dabei konnte man jedoch für die räumliche Auflösung von Strukturen des Schwerfeldes nur einige tausend Kilometer erreichen. Weiter dienen die Schweremessungen aus dem All dazu, globale Geoidmodelle und ihre Strukturen darzustellen. Eine andere Darstellung des Schwerfeldes ist durch Schwereanomalien, gemessen auf dem Geoid, d.h. in Höhe Null, möglich. Diese variieren zwischen $-0,003 \text{ m/s}^2$ (-300 mgal) und $+0,003 \text{ m/s}^2$ (+300 mgal), also um etwa $\pm 0,3$ Promille der mittleren Schwerebeschleunigung.

Was die Form der Meeresoberfläche betrifft, so kann diese vom Satellit mittels Altimetrie direkt gemessen werden. Hierbei wurde allerdings festgestellt, daß die mittlere Meeresoberfläche, d. h., die Meeresoberfläche ohne Gezeiten und Wellen, um bis zu etwa ± 1 m von der Geoidfläche abweicht. Als Grund für die Meeresoberflächen-Topographie sind großräumige Meeresströmungen zu nennen. Indem die Satellitaltimetrie zur Höhenvermessung der Meeresoberfläche angewandt wurde, konnte die Genauigkeit der Geoidbestimmung wesentlich verbessert werden.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die für globale Schwerfeld- und Geoidlösungen

benutzten Satelliten mit Angaben zum Start und zur Satellitenbahn sowie zur Masse, Größe und Art des Satelliten und zu verwendeten Meßtechniken.

Tabelle 1. Satelliten im erdnahen Raum, die für globale Schwerefeld- und Geoidlösungen benutzt werden

Satellit	Start	Flughöhe	Bahnneigung	Periode	Masse	Durchmesser	Art	Meßtechniken
	D1-C	8.02.1967, Frankreich, CNES	1000 km	40°	101 min	23 kg	0,50 m	passiv Laser
D1-D	15.02.1967, Frankreich, CNES	1200 km	40°	108 min	23 kg	0,50 m	passiv	Laser
PEOLE	12.12.1970, Frankreich, CNES	750 km	15°	98,6 min	70 kg			Laser + Kamera
STARLETTE	6.02.1975, Frankreich, CNES	812 km	49,8°	104 min	47 kg	0,24 m	passiv	Laser
STELLA	26.09.1993, Frankreich, CNES	800 km	98,6°	101 min	48 kg	0,24 m		Laser + Radiowellen
GEOS-3	9.04.1975, USA, NASA	824 km	115°	102 min	346 kg	0,57 m		Laser + Radar- Altimeter
LAGEOS1	4.05.1976, USA, NASA	5860 km	109,8°	225 min	407 kg	0,60 m	passiv	Laser
LAGEOS2	22.10.1992, USA, NASA; Italien	5620 km	52,6°	223 min	405 kg	0,60 m	passiv	Laser
METEOR-3	27.11.1984, Sowjetunion	1200 km	82°	109 min	2500 kg			Laser
AJISAI	12.08.1986, JAPAN, NASDA	1490 km	50°	116 min	685 kg	2,15 m	passiv	Laser
ETALON-1	10.01.1989, Rußland	19120 km	64,9°	676 min	1415 kg	1,294 m	passiv	Laser
ETALON-2	31.05.1989, Rußland	19120 km	65,5°	675 min	1415 kg	1,294 m	passiv	Laser
ERS-1	17.06.1991, Europa, ESA	780 km	98,5°	100 min	2384 kg			Laser + Radar- Altimeter
ERS-2	21.04.1995, Europa, ESA	785 km	98,5°	100 min	2516 kg			Laser + Radar- Altimeter + PRARE
TOPEX	10.08.1992, USA, NASA; Frankreich, CNES	1336 km	66°	112 min	2402 kg			Laser + Mikrowellenaltimeter
GFZ-1	19.04.1995, Deutschland, GFZ	390 km	51,6°	92 min	21 kg	0,21 m	passiv	Laser
WESTPAC	10.07.1998, Western Pacific Laser Tracking Network	835 km	98°	101 min	23,8 kg	0,24 m		Laser + Radiowellen
NOVA3	12.11.1984, USA	1000 km	90°					Radiowellen
GEOSAT	13.03.1985, USA	780 km	108,10°	100,40 min	635 kg			Radiowellen + Radar-Altimeter
SPOT-2	22.01.1990, Frankreich, CNES; Belgien, Schweden	822 km	98,7°	101,4 min	1800 kg			Laser + Radiowellen
SPOT-3	26.09.1993 Frankreich, CNES; Belgien Schweden	822 km	98,7°	101,4 min	1800 kg			Laser + Radiowellen
CHAMP	15.07.2000, Deutschland, GFZ	474 km	87,3°	94 min	525 kg			Laser + Radiowellen

1976 **G. Balmino, C. Reigber** und **B. Moynot** bestimmen aus rezenten Satellitenbeobachtungskampagnen das Geoid GRIM2. Seine durch Höhenlinien dargestellten Strukturen haben ein Maximum von +82 m bei Neu-Guinea und ein Minimum

- von -108 m südlich von Indien, wobei die Unsicherheit der Geoiddarstellung ± 5 m beträgt. Als Referenzellipsoid für die globalen Schwerefeld- und Geoidlösungen wird das "mittlere Erdellipsoid" des GRS 80 (Geodetic Reference System 1980) mit den Halbachsen $a = 6\,378\,137,000$ m und $b = 6\,356\,752,314$ m und der Abplattung $f = 1 : 298,257\,222$ benutzt. Was das für GPS (Global Positioning System, operationell ab 1995) benutzte sog. WGS 84 (World Geodetic System 1984) betrifft, so wird hierbei ein Erdellipsoid mit den Parametern $a = 6\,378\,137,000$ m, $b = 6\,356\,752,315$ m und $f = 1 : 298,257\,223\,563$ verwendet. Das heißt, daß das Erdellipsoid des WGS 84 praktisch mit dem mittleren Erdellipsoid des GRS 80 identisch ist.
- ab 1980
- 1.01.1992 Gründung des GeoForschungsZentrums (GFZ) Potsdam
Speziell für die Schwerefelderkundung entworfen und gebaut, wird der Satellit GFZ-1 - ein passiver, mit 60 Laser-Retroreflektoren ausgerüsteter Kleinsatellit von der Größe eines Fußballs und mit einer Masse von ca. 21 kg - aus der russischen Raumstation MIR ins All gestartet. Der auch als Space-Trabbi bezeichnete Satellit fliegt in 390 km Höhe mit einer Bahnneigung von 52° zur Äquatorebene um die Erde.
(Der Satellit GFZ-1 ist nach einer Lebensdauer von 4 Jahren im Juni 1999 in der Erdatmosphäre verglüht.)
Da der Satellit die Erde in einer nicht-polaren Bahn umkreiste, hatte die Mission folgende Nachteile: Die nur auf einem Gürtel zwischen 52° nördlicher und südlicher Breite verlaufende Bahn des Satelliten konnte nur sehr lückenhaft durch ca. 12 Laserstationen verfolgt werden. Außerdem wurde die Auswertung der Messungen noch erschwert, weil sich bei einer sehr niedrigen Flugbahn die Restatmosphäre auf die Satellitenbewegung störend auswirkt.
- 19.04.1995
- 15.07.2000 Start des deutschen Geoforschungssatelliten CHAMP (CHALLENGING Mini-Satellite Payload for Geosciences and Application), der anfangs in 452 km Höhe in einer polaren kreisförmigen Bahn die Erde umrundet. Der 525-kg-Satellit, der zusammen mit einem Meßausleger 8 m lang ist, hat Instrumente zur Vermessung von Schwere- und Magnetfeld und zur Sondierung von Atmosphäre und Ionosphäre an Bord.
- 2002 Das am GFZ in Potsdam berechnete Geoidmodell der Erde beruht auf den mit bisher unerreichter Genauigkeit erzielten Beobachtungen der Bahnstörungen des Satelliten CHAMP. Zur Veranschaulichung des Geoids der Erde wurden die Abweichungen des Potsdamer Geoids vom Rotationsellipsoid, die zwischen -110 m und +90 m liegen, benutzt. Die stark überhöhte, bildhafte Darstellung derselben als Figur der Erde ist die sogenannte "Potsdamer Kartoffel".
- 17.03.2002 Start des Satellitenpaars GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), d. h., zwei CHAMP-ähnlichen Satelliten, die als Tandem in 220 km Abstand in derselben polaren Bahn 500 km über der Erde fliegen. Die amerikanisch-deutsche GRACE-Mission hat die gleichen Aufgaben wie die CHAMP-Mission, ausgenommen Magnetfeldvermessung. Wie oben erwähnt, zeigen globale Schwerefeld- und Geoidmodelle der Erde, die als Satellitenlösungen nach der Methode der Satellitenbahnstörungen bestimmt werden, nur großräumige Strukturen mit einigen tausend Kilometern Ausdehnung. In den letzten Jahrzehnten konnten sie aber durch die Analyse von immer mehr und besseren Messungen ständig verbessert werden. Schließlich haben die Schwerefeldmissionen GFZ-1, CHAMP und GRACE dazu geführt, daß in den letzten Jahren große Fortschritte in der räumlichen Auflösung und Genauigkeit des Schwerefeldmodells der Erde gemacht werden konnten. Gegenüber bisherigen Schwerefeld- und Geoidmodellen werden Strukturen mit einigen hundert Kilometern Durchmesser aufgelöst und dabei eine bis um 2 Größenordnungen höhere Genauigkeit erreicht. Speziell mit GRACE konnten erstmals zeitliche Variationen des Schwerefeldes bzw. des Geoids der Erde erfaßt werden.
Bei sogenannten Kombinationslösungen für die globale Schwerefeldmodellierung werden altimetrisch über den Ozeanen gewonnene Geoiddaten und gravimetrisch über den Kontinenten gewonnene Schweredaten für geographische Blöcke von 50 km Seitenlänge gerastert und dann deren Mittelwerte zusammen mit Satellitenbahndaten verarbeitet, um hochaufgelöste Schwerefeld- bzw. Geoidmodelle der Erde zu erhalten.
- Sept. 2007 Voraussichtlicher Start des Satelliten GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) mit einer Flughöhe von 240 km. Ziel der Mission ist die Bestimmung eines globalen Geoidmodells mit einer Genauigkeit von ca. ± 1 cm bei einer räumlichen

Auflösung von 100 km.