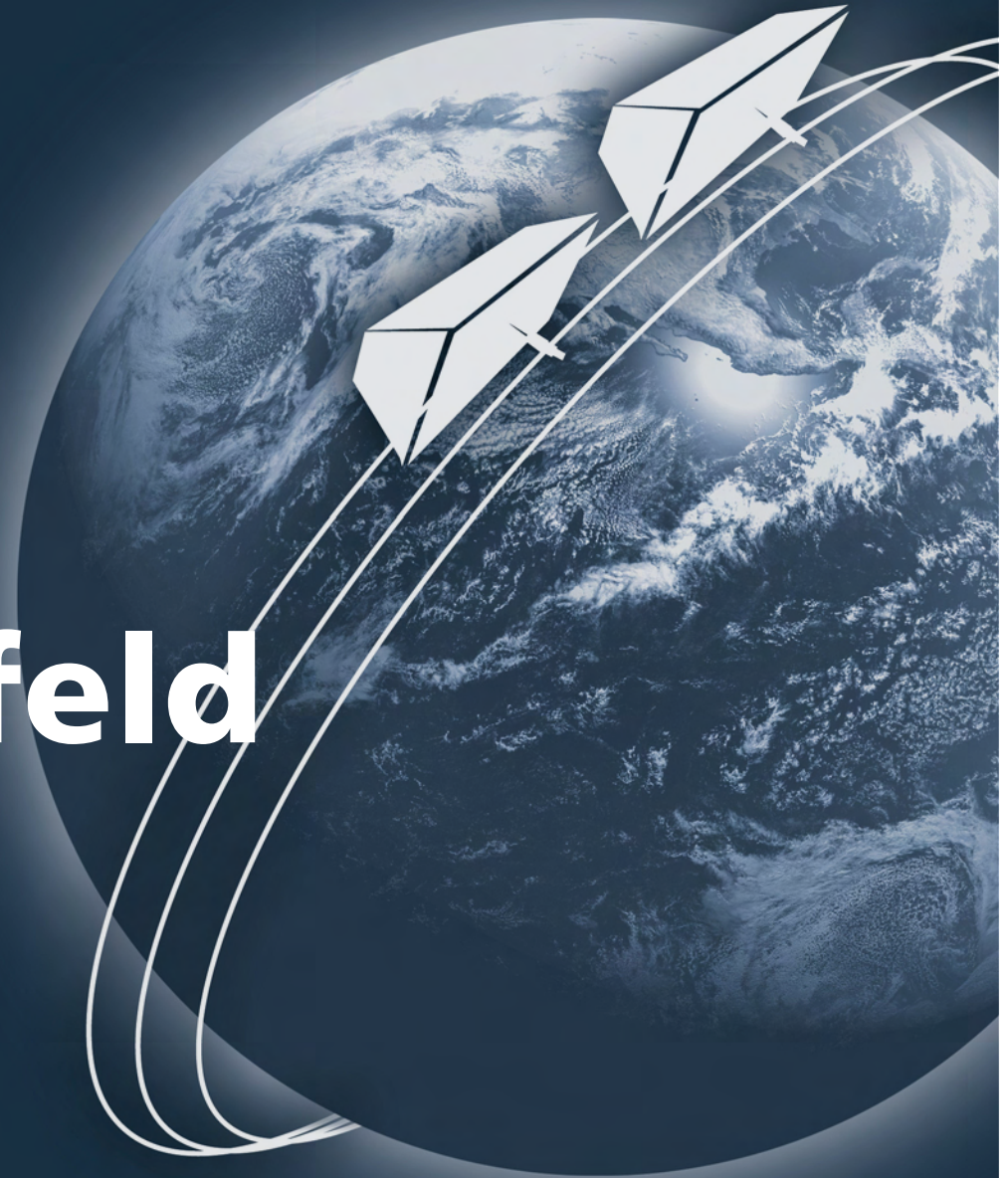




GEOTECHNOLOGIEN

Das **Schwerefeld** der **Erde**





Inhalt

01	Die unsichtbare Figur der Erde	5
02	Was ist Gravitation?	9
03	Im Zeichen der Erdbeschleunigung	13
04	Vom Pendel bis zu Satelliten	17
05	CHAMP, GRACE und GOCE	21
06	Erst Erfassen, dann Auswerten	29
07	Gemacht für die Anwendung	33
08	Blick in die Zukunft	41



Die unsichtbare Figur der Erde

Ein Körper wiegt überall auf der Erde das Gleiche, richtig? Falsch. Die allgegenwärtige Gravitationskraft unseres Planeten zieht uns je nach Ort unterschiedlich stark an. Diese minimalen Schwankungen sind für Forscher hochinteressant.

Die Erde ist eine Kugel – das weiß jedes Kind. Aber woher? Selbst aus dem 60. Stock eines Hochhauses oder durch das Fenster eines in 10 Kilometer Höhe fliegenden Passagierjets betrachtet, sieht der Horizont schnurgerade aus. Um die kugelförmige Erde mit eigenen Augen zu sehen, muss man schon weiter aufsteigen, etwa zur internationalen Raumstation ISS oder gleich zum Mond. Ist der Abstand zu unserem Planeten groß genug, wird die Krümmung seiner Oberfläche sichtbar.

Und im Alltag? Auch hier kann man die Figur der Erde ausmachen – wenn auch eher indirekt wie zum Beispiel bei einem Blick aufs Meer. Dieses lässt die Rotoren von 180 Meter hohen Windkraftanlagen und selbst die mächtigen Rümpfe großer Containerschiffe hinter dem Horizont

*Bild links:
Bildcollage der Erde aus mehreren Satelliten-
bildern aufgenommen am 4. Januar 2012
Quelle: NASA/ NOAA/ GSFC/ Suomi NPP/
VIIRS/N. Kuring*



Aus dem Weltall ist die „Krümmung“ der Erde“ gut zu sehen. Tatsächlich kann aus einer Flughöhe von rund 400 Kilometern aber nur ein Ausschnitt der Erdoberfläche erkannt werden. Auf diesem Foto, das 2007 aus dem Shuttle Endeavour aufgenommen wurde, ist ein Ausschnitt des Mittelmeers und die Internationale Raumstation zu sehen.

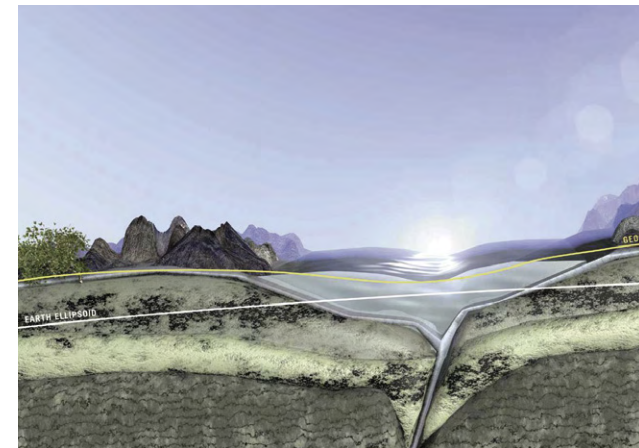
Quelle: STS 118/NASA

verschwinden, wenn diese nur weit genug weg sind. Mit dem Wellengang hat das nichts zu tun, sondern mit der Erdkrümmung. Zwischen einem weit entfernten Objekt und uns liegt ein Teil des Erdballs, der unserer geraden Sichtlinie „im Weg steht“. Das Meer zeigt uns also, dass der Boden unter unseren Füßen tatsächlich krumm ist. Und es räumt noch mit einem weiteren Vorurteil auf – der Konstanz der Erdanziehungskraft.

Die Meeresoberfläche weist lang ausgestreckte Buckel und Dellen auf, die nicht von den Gezeiten oder starkem Seegang stammen. Es mag unserer Intuition zuwider laufen, aber die Anziehungskraft unseres Planeten schwankt von Ort zu Ort. Und genau diese Schwankungen zeigen sich in den großflächigen Unebenheiten des Meeresspiegels. Im Gegensatz zum festen Gestein der Kontinente kann das Wasser der Ozeane die Höhen und Tiefen der Erdschwere nachvollziehen und spiegelt somit dessen Variation wider – wenn auch nur in Höhenunterschieden zwischen 60 und 100 Metern, dafür aber ausgestreckt über tausende von Kilometern.

Diese direkte Verknüpfung zwischen Meeresspiegel und Schwerkraft machen sich Wissenschaftler zunutze, wenn sie die Erdschwerevariationen bildlich darstellen wollen. Sie erzeugen das Bild einer vollständig von Wasser bedeckten Erde, deren Oberfläche dann überall die Schwerevariationen direkt anzeigt. Diese Figur der Erde wird „Geoid“ genannt und ist eine Art Referenzfläche. An jedem Punkt der Geoidoberfläche wirkt die Schwerkraft exakt lotrecht; Abweichungen von den Werten, die eine perfekte Kugel, oder wie im Fall der Erde, eine leicht abgeplattete Kugel aufweisen würde, nennt man „Schwereanomalien“. Und genau in diesen stecken wichtige Informationen, denen Forscher mit modernster Satellitentechnik auf der Spur sind.

Die möglichst genaue Kenntnis des Geoids ist nicht nur für die Geowissenschaften interessant, sondern sowohl für praktische Anwendungen im Vermessungs- und Bauwesen wie auch in der Navigation und in der Raumfahrt. Wie man die Schwerefelddaten gewinnt und auswertet und welche Informationen überhaupt im Gravitationsfeld der Erde bzw. seinen winzigen Schwankungen stecken, darüber soll dieses Heft einen Eindruck vermitteln.



Die einfachste Form der Darstellung der Erde ist das so genannte Erd-Ellipsoid (weiß). Es stellt die Erde als einfache, leicht abgeplattete Kugel dar. Dagegen folgt das Geoid (gelb) der Fläche, auf der die Anziehungskraft der Erde immer lotrecht wirkt.

Quelle: AOES Medialab/ ESA

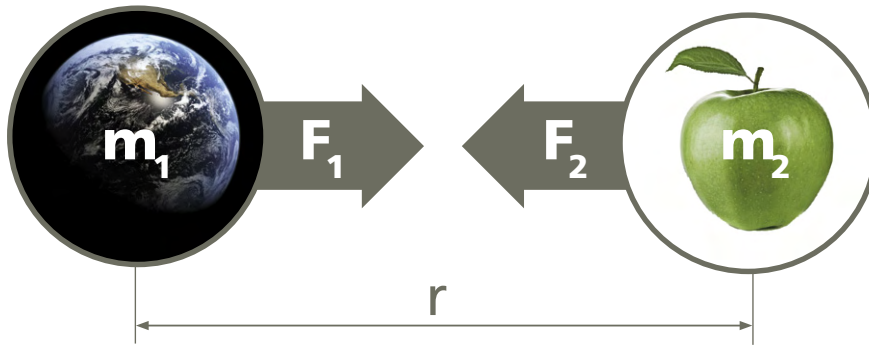


Was ist **Gravitation?**

Die Erde wirkt anziehend. Aber wie funktioniert diese Anziehungskraft? Das Grundgesetz zur Gravitation lieferte ein englischer Naturforscher schon im 17. Jahrhundert. Stein des Anstoßes: ein Apfel.

Für uns ist sie so normal, dass wir ihre Kraft schon nicht mehr bewusst wahrnehmen. Die Gravitation (lat. *gravitas* = Gewicht) hält die Erde zusammen und alles und jeden auf ihrem Boden. Sie zwingt Kanonenkugeln auf Parabelbahnen und man muss schon mit mindestens 40.320 Stundenkilometern in Richtung Weltraum fliegen, um ihr zu entkommen. Allgemein kann man sagen: Gravitation beschreibt die gegenseitige Anziehungskraft zweier Objekte aufgrund ihrer Masse. Dabei hängt die Masse eines Objekts damit zusammen, aus wie viel Materie es besteht; sein Gewicht beschreibt, wie stark die Gravitation auf das Objekt wirkt.

*Bild links:
Rekord-Fallschirmspringer Felix Baumgartner
beim freien Fall über New Mexico während
eines Testsprunges
Quelle: L. Aikins/Redbull Photofiles*



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

*Das Prinzip der Anziehungskräfte zwischen zwei Körpern:
 Jeder Körper zieht aufgrund seiner Masse (m_1) andere Körper (hier m_2) mit der Kraft F_1 an. Dabei zieht gleichzeitig der zweite Körper auch den ersten aufgrund der Schwerkraft an. Beide Kräfte unterscheiden sich dabei nur in der Richtung, in die sie wirken. Entscheidend für die Stärke der Kraft ist die Gravitationskonstante G und der Abstand der beiden Körper zueinander (r). Je weiter die Körper voneinander entfernt sind, desto geringer wird die Anziehungskraft zwischen beiden.*

Das Schlüsselwort ist das „gegenseitig“. Fällt ein Apfel zu Boden, dann zieht nicht nur die Erde den Apfel an, sondern auch der Apfel die Erde und das sogar mit der gleichen Kraft! Denn alles was eine Masse hat, übt eine Gravitationskraft auf andere Objekte aus – egal, ob eine 6 Trilliarden Tonnen schwere Erde oder ein 150 Gramm schwerer Apfel. Nur die Folgen dieser gegenseitigen Anziehung sind unterschiedlich. Der Apfel wird aufgrund seiner geringeren Masse viel stärker beschleunigt als die Erde. Bevor diese überhaupt in Bewegung gerät, fällt das Obst schon auf den Boden.



NEWTON

Es war **Sir Isaac Newton** (1643 - 1727), der bereits im Jahre 1686 seine eigenen Beobachtungen der Erdanziehung in eine handliche Form brachte: das Gravitationsgesetz. Es beschreibt die Kraft, die zwei Körper aufeinander ausüben als Funktion ihrer Massen und des Abstands zwischen ihnen. Dabei nimmt die Kraft mit zunehmendem Abstand der Objekte voneinander ab. Kommt ein Objekt in das Gravitationskraftfeld eines anderen Objekts, wird es zu dessen Zentrum hin beschleunigt. Angewandt auf unsere Erde bedeutet das: Dinge fallen in ihrem Schwerfeld in Richtung Erdkern - und prallen somit auf den Boden. Genau wie das Fallobst, das Newton angeblich, unter einem Apfelbaum sitzend, erst auf die Idee des Gravitationsgesetzes brachte.



Im Zeichen der Erdbeschleunigung

Im freien Fall zeigt sich die ganze Kraft des Schwerefelds der Erde. So nimmt in Erdnähe die Fallgeschwindigkeit stetig zu. Für Wissenschaftler stecken im Wert dieser Erdbeschleunigung wichtige Erkenntnisse über unsere Erde.

Fällt etwas zu Boden, dann mit zunehmender Falldauer immer schneller. Wie stark diese Beschleunigung ist, zeigt ein kleines Gedankenexperiment: Lassen wir von der Spitze des 157 Meter hohen Kölner Doms eine Münze fallen und ignorieren Luftreibung und -widerstand, dann hat die Münze nach den ersten 50 Metern bereits auf 112 km/h beschleunigt. Auf den Boden trifft sie schließlich mit beeindruckenden 200 Stundenkilometern – so schnell wie ein Sportwagen.

Die Erdbeschleunigung, nach ihrem lateinischen Ursprung kurz „g“ genannt, beträgt in etwa $9,81 \text{ m/s}^2$ und ist eine direkte Folge der Gravitationskraft, die die Erde auf alle Objekte in ihrem Umfeld ausübt. Das Faszinierende an g: sie ist für alle Objekte gleich, egal ob fallende Münze oder fallender Amboss.

*Bild links:
Blick vom Kölner Dom auf den Rhein und
die Kölner Altstadt
Quelle: C. Spannagel / Flickr*



Kurz nach dem Experiment von Scott:

- ❶ Hammer (Bildmitte, leicht im Schatten) und
- ❷ Feder (untere Bildmitte) auf der Oberfläche des Monds.

Die Aufnahme wurde im August 1971 erstellt.

Quelle: Apollo 15 INASA

Die Masse des fallenden Objekts spielt keinerlei Rolle. Nur die Reibung mit der Luft sorgt dafür, dass der Amboss schneller den Boden erreicht. Weil dies aber so gar nicht mit unserer Alltagserfahrung vereinbar ist, gab es schon etliche Fallversuche im Vakuum. Das wohl aufsehenerregendste lieferte im Jahr 1971 der Apollo-Astronaut David Scott, der auf der atmosphärenlosen Mondoberfläche Hammer und Vogelfeder gegeneinander antreten ließ. Und siehe da: beide fielen exakt gleich schnell und kamen gleichzeitig auf dem staubigen Boden an.

Trotzdem: wenn man ganz genau hinsieht wie nur Forscher dies mit ihrer Ausrüstung können, dann erkennt man, dass auch die Erdbeschleunigung am Erdboden leicht variiert. Zum einen ist da der Abstand vom Erdkern, der eine Rolle spielt; schließlich ist die Gravitationskraft abhängig vom Abstand der Objekte zueinander. Auf einem 6.000 Meter hohen Berg wird man weniger stark zum Erdkern gezogen als im Tal. Aber selbst wenn man von einer ebenen Fläche ausgeht, variiert „g“ leicht. Und da laut Gravitationsgesetz das fallende Objekt mit seiner Masse keinerlei Einfluss auf die Erdbeschleunigung hat, kann es nur die Erde selbst sein, die für dessen Schwankungen verantwortlich ist.



Einflussfaktoren der Gravitationsbeschleunigung der Erde: Erdöllagerstätten können sich zum Beispiel in Änderungen der fünften Nachkommastelle zeigen, die Gezeiten der Ozeane zeigen sich in Variationen der sechsten Nachkommastelle, große Gebäude sind in der siebten Nachkommastelle erkennbar.

Quelle: AOES Medialab/ESA

Wissenschaftler wissen schon länger, was Einfluss auf die Erdbeschleunigung „g“ nehmen kann. Beispielsweise eine ungleiche Verteilung des Materials im Erdinneren: Unterschiedliche Gesteine, Grundwasserspeicher, Erdölvorkommen und vieles mehr haben verschiedene Massen. Außerdem ändert die Erde ständig ihr Aussehen: Plattentektonik, Vulkanausbrüche, das Abschmelzen der Pole, bis hin zu den Gezeiten beeinflussen die Gestalt der Erde und damit die Gravitationskraft. Selbst von Menschen gemachte Bauwerke können lokal die Schwerebeschleunigung beeinflussen, wenn auch nur in der siebten Nachkommastelle.

Wenn aber all diese Vorgänge die Gravitationsbeschleunigung beeinflussen, heißt dies im Umkehrschluss, dass man aus Schwankungen von „g“ auch Rückschlüsse auf Vorgänge im Erdinneren ableiten

kann. Forscher vermessen dazu die Gravitationsbeschleunigung weltweit. Das Ergebnis ist der bereits erwähnte Geoid – eine gedachte Referenzfläche auf der „g“ lotrecht steht. Vergleicht man diese Fläche mit der einer idealen rotationssymmetrischen Erde (von der Abplattung durch die Fliehkraft einmal abgesehen), dann ergeben sich Abweichungen, deren Ursachen nur im Erdkörper selbst verborgen sein können.

Diese Abweichungen können mit Gravimetern heute auf acht Dezimalstellen genau gemessen werden. Aus ihnen können Forscher nicht nur die Orte von Rohstoffvorkommen herauslesen, sondern auch die Ursachen von Vulkanausbrüchen, die Bewegungen von Kontinentalplatten und sogar die Veränderungen von Meeresströmungen aufgrund des Klimawandels. Wenn große Massen an der Oberfläche oder im Erdinneren in Bewegung geraten, spiegelt sich das in der Veränderung der Erdbeschleunigung wider. Dabei macht es keinen Unterschied, ob es sich bei den Massen um das Wasser der Meere oder geschmolzenes Gestein in Magmakammern handelt.

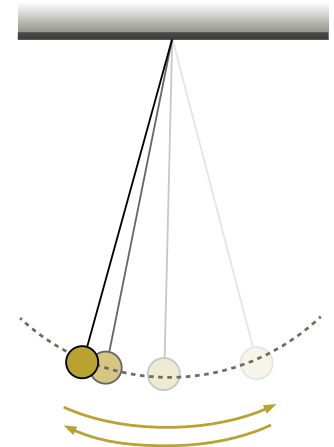
Und sogar Bergsteiger dürfen sich über die möglichst genaue Vermessung von „g“ freuen. Wird doch endlich die Frage geklärt, wie hoch der Mount Everest, die Zugspitze und der Montblanc „wirklich“ sind. Bereits seit den 1990er Jahren wird bei der Höhenmessung der Einfluss der schwankenden Gravitation berücksichtigt. Die exakte Vermessung des Geoids vereinfacht diese Berechnungen enorm und schafft endlich ein globales Referenzsystem, eine globale „Normal-Null“ Fläche über Ländergrenzen und Kontinente hinaus, von der aus die Berge dieser Welt vermessen werden können.

Vom Pendel bis zu Satelliten

Die Schwankungen der Erdanziehung mögen winzig sein, in ihnen steckt aber ein gewaltiger Informationsschatz. Um den zu bergen, braucht man nur die richtige Ausrüstung.

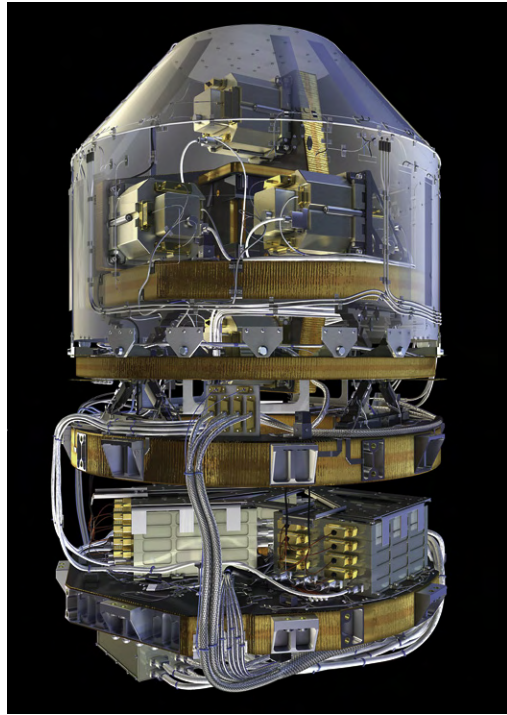
Die Gravimetrie fasst all jene Methoden zusammen, die sich mit der Vermessung der Schwerkraft beschäftigen. Zu ihren einfachsten und ältesten Werkzeugen gehört das Pendel. Das Messprinzip ist dabei denkbar einfach: Kennt man bei der frei schwingenden Pendelmasse die Länge des Fadens, an dem sie aufgehängt ist und misst die Dauer einer Schwingung, erhält man nach kurzer Rechnung den lokalen Wert für die Erdbeschleunigung. Je größer die Erdschwere, desto schneller schwingt das Pendel.

Bereits im 18. Jahrhundert wurden auf diese Weise Vermessungen des Schwerefelds vorgenommen. Der Nachteil: die Methode ist nicht sehr genau. Dass Wissenschaftler heutzutage Daten noch im Bereich der achten Nachkommastelle analysieren können, verdanken sie modernen Gravimetern. Diese Hightech-Messgeräte messen die Schwerebeschleunigung mithilfe von Federn, deren Längen sich unter



Mit einem Fadenpendel kann die Erdbeschleunigung „g“ gemessen werden, indem man eine beliebige Masse an einem Faden der Länge (l) aufhängt. Die Erdbeschleunigung kann aus der Länge (l) und der Messung der Schwingungsdauer (T) bestimmt werden, die das Pendel für eine harmonische Schwingung benötigt. Die Kreiszahl π (Pi) ist eine mathematische Konstante ($\pi=3,14159\dots$), die als Verhältnis des Umfangs eines Kreises zu seinem Durchmesser definiert ist.

$$g = 4 \pi^2 \frac{l}{T^2}$$



Einblick in ein modernes Gravimeter, wie es an Bord des GOCE Satelliten eingesetzt wird. Auf der obersten Etage sind die sechs Beschleunigungssensoren zur Messung der Veränderungen der Erdbeschleunigung angebracht (je zwei pro Achse), darunter befinden sich die Sensorsteuerung und die Datenspeichereinheit. Die Zwischenplatten dienen unter anderem zur Ableitung der Wärme.

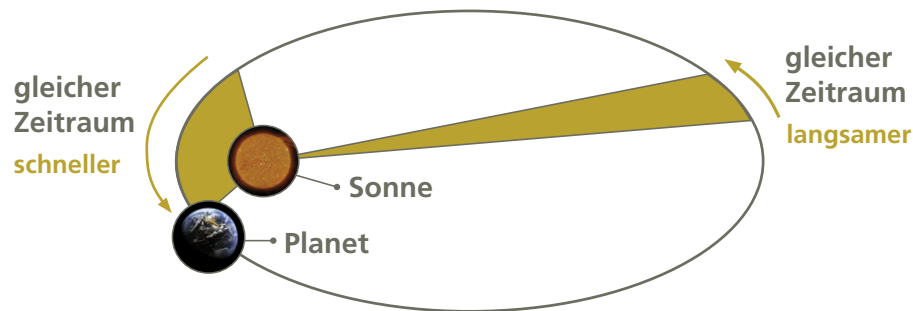
Quelle: Projektbüro GOCE/ESA

Einfluss der Gravitation verändern bzw. mittels fallengelassener Probemassen, deren Durchgangszeiten gemessen werden.

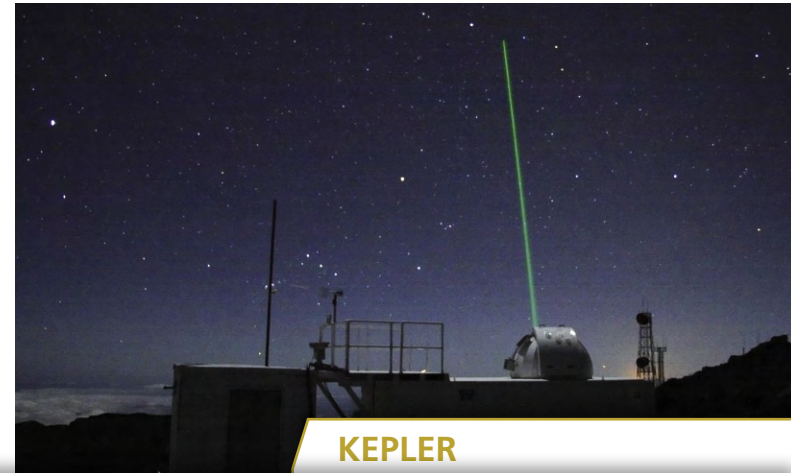
Aber nicht nur die Entwicklung immer besserer Messgeräte kommt der Gravimetrie zugute, sondern vor allem der Ort der Datenerfassung. Früher wurde das Schwerefeld durch zeitaufwendige Landvermessungen bestimmt. Dies gelang aber nicht flächendeckend. Messergebnisse waren oft nicht kompatibel, weil unterschiedliche Höhenbezugssysteme genutzt wurden. Heutzutage kreisen künstliche Beobachter um den Erdball und erfassen gewaltige Datenmengen im globalen Maßstab.

Eine globale, kontinuierliche, homogene und hochgenaue Vermessung des Erdschwerefeldes ist nur mit Hilfe von Satellitenmethoden möglich. Ebenso wie die ungleichmäßige Verteilung der Gesteinsdichten im Erdinneren, die die Form des Geoids bestimmt, spüren auch Satelliten diese Variationen als kleine Störbeschleunigungen. Damit haben die Bahnen der künstlichen Erdtrabanten nicht die ideale elliptische Form, wie sie die Keplerschen Gesetze postulieren, sondern weisen Beulen und Dellen auf. Diese lassen genaue Rückschlüsse auf das Gravitationsfeld der Erde und dessen Schwankungen zu. Die Satelliten bzw. ihre Bewegungen werden so zu Sonden, mit denen wir das Erdschwerefeld ausloten.

Messen kann man die genaue Flugbahn eines Satelliten auf unterschiedliche Arten. Zum Beispiel sendet man dazu Laserimpulse von Bodenstationen auf spezielle Reflektoren an seiner Außenseite. Aus der Laufzeit des am Satelliten reflektierten Strahls kann man dann seinen Abstand zur Bodenstation sehr genau berechnen und daraus die Form der Bahnkurve ableiten.



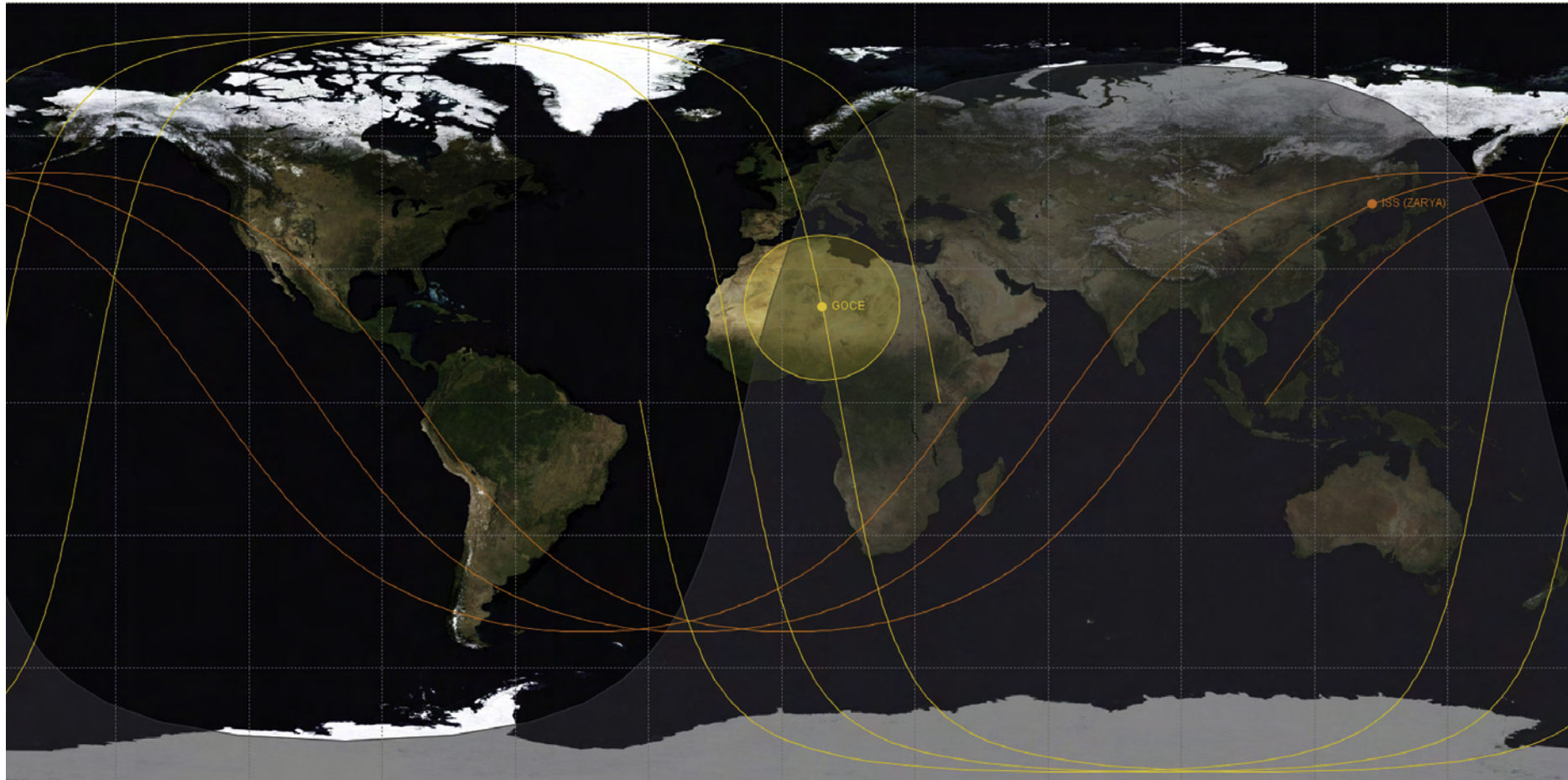
Umlaufbahn eines Planeten



KEPLER

Satelliten kreisen um die Erde, Planeten um die Sonne. Im Sprachgebrauch gehen wir immer von einem Kreis aus, auf dem sich Objekte um andere Objekte unter dem Einfluss der Gravitation bewegen. In Wahrheit ist der Kreis aber nur der Spezialfall unter den Umlaufbahnen. Der deutsche Astronom Johannes Kepler fand bereits vor über 400 Jahren anhand von Beobachtungen unseres Planetensystems heraus, dass die Mechanik der Umlaufbahnen weitaus komplexer ist. Seine Erkenntnisse formulierte er in drei Gesetzen, den Keplerschen Gesetzen. Vereinfacht ausgedrückt besagen diese: Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen um die Sonne, die jeweils in einem Brennpunkt dieser Ellipsen liegt. Dabei werden die Planeten schneller, wenn sie der Sonne nah kommen und langsamer, wenn sie an einem sonnenferneren Punkt der Umlaufbahn sind. Die Gesetze gelten universell, also für alle Massen, die einander umkreisen; für das System Erde-Mond genauso wie für das System Erde-Satellit.

*Umlauftrajektorien des Satelliten GOCE (gelb) und der Internationalen Raumstation ISS (rot) um die Erde. Die Umlaufzeit einmal um die Erde beträgt cirka 90 min. Mit etwa 16 Umläufen kann die gesamte Erde abgebildet werden.
Quelle: erstellt mit JSatTrek*



CHAMP GRACE GOCE

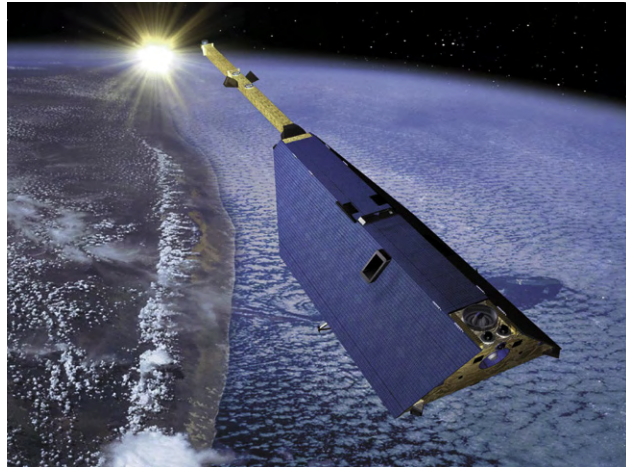
Satelliten sind unsere Augen im All.
Sie beobachten das Wetter, Vulkane, Waldbrände
und sogar das Schwerefeld der Erde.
Damit ermöglichen sie einen Blick ins Innerste
unseres Planeten.

Die Untersuchung des Geoids und dessen Bezug zum Schwerefeld hat in Deutschland eine lange Tradition. So wurde bereits im Jahre 1892 auf dem Potsdamer Telegrafenberg das Geodätische Institut gegründet, die Wiege der wissenschaftlichen Geodäsie, der Erkundung und Bestimmung der geometrischen und physikalischen Figur der Erde. Jahrzehntlang war die in Potsdam gemessene Schwerkraft der Bezugswert der weltweiten Schwerefeldbestimmung.

Aber auch bei der präzisen Vermessung von Satellitenbahnen und der daraus abgeleiteten Berechnung der Figur der Erde waren Potsdamer Geoforscher und Wissenschaftler deutscher Universitäten Pioniere. So setzten Astronauten im Jahre 1995 von der russischen Raum-



Der Satellit GFZ-1 wurde am Deutschen GeoForschungsZentrum in Potsdam entwickelt. Gut zu erkennen sind die Reflektoren (Spiegelflächen), die gleichmäßig verteilt in das Grundgerüst eingelassen sind.
Quelle: GFZ Potsdam



Der Satellit CHAMP in einer Animation: Zu erkennen ist der Auslegerarm, an dessen Ende die Messungen des Magnetfeldes durchgeführt wurden sowie die Solarzellen (blaue Flächen) zur Stromversorgung. Der Beschleunigungssensor ist im Satelliten verbaut und nicht sichtbar.

Die GPS-Antenne zur Positionsbestimmung befindet sich auf der Oberfläche am hinteren Ende des Satelliten.

Quelle: ASTRIUM/EADS

station MIR den Kleinsatelliten GFZ-1 in circa 310 Kilometern Höhe aus. Seine fußballgroße Hülle hatte man mit 60 Reflektoren bestückt, die zur Distanzmessung per Laserstrahl genutzt werden konnten. Die geringe Flughöhe von GFZ-1 ermöglichte eine recht genaue Untersuchung von Störungen der Satellitenbahnen bzw. des Erdschwerefeldes. Gleichzeitig verkürzte seine niedrige Bahn auch seine Lebensdauer – die Reibung mit der Luft der Hochatmosphäre ließ den kleinen Satelliten nach etwas mehr als vier Jahren erfolgreicher Arbeit wie eine Sternschnuppe verglühen.

Seine Aufgabe übernahm im Jahre 2000 der GFZ-Satellit CHAMP, ein Akronym für „Challenging Mini-Satellite Payload“. Im Gegensatz zum passiv arbeitenden GFZ-1, der lediglich seinen Körper der Geodäsie zur Verfügung stellte, war CHAMP ein „aktiv“ arbeitender Satellit. Zehn Jahre lang lieferte er sehr viel präzisere Schweredaten als sein Vorgänger. Dies lag zum einen daran, dass CHAMP der erste Satellit war, der einen Zweifrequenz-GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung flog. Zum anderen wurde auf CHAMP auch erstmals ein Beschleunigungsmesser verwendet, der direkt die Abbremsung des Satelliten durch die Restatmosphäre bzw. durch den solaren Strahlungsdruck messen konnte. Damit konnten die Abweichungen einer Umlaufbahn von der idealen Keplerellipse zum ersten Mal mit einem einzigen Satelliten kontinuierlich mit Zentimetergenauigkeit und im Sekundentakt über einen Zeitraum von etwas mehr als 10 Jahren bis zum September 2010 bestimmt werden. Das Ergebnis sind mittlere, statische Schwerefeldmodelle von nie da gewesener Präzision.

Im Jahre 2002 startete, beeinflusst durch den Erfolg der CHAMP-Mission, das deutsch-amerikanische Projekt „Gravity Recovery and Climate Experiment“, kurz GRACE. Das Besondere: dieses Mal wurden zwei Satelliten gleichzeitig ins All geschossen, die seitdem als Tandem die Erde umrunden. Wie bei einer nie endenden Verfolgungsjagd fliegt ein Satellit dem anderen Satelliten in ca. 220 Kilometern Abstand hinterher. Strenggenommen müsste man von „durchschnittlich 220 Kilometern“ sprechen, denn der Abstand beider Satelliten variiert voneinander. Und genau das ist der Trick bei GRACE: im ungleichmäßigen Schwerefeld der Erde ist das Duo wechselnden Kräften ausgesetzt. Der vorauseilende Satellit kann dadurch abgebremst, sein Verfolger aber gleichzeitig beschleunigt werden.



Satellitenmissionen des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt werden meist aus dem Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen gesteuert. Hier können die Flugeigenschaften der Satelliten im Detail kontrolliert und eventuell notwendige Manöver zur Änderung der Flugbahn durchgeführt werden. Zu sehen ist der Kontrollraum, aus dem unter anderem auch der Start der Missionen CHAMP und GRACE überwacht wurde.

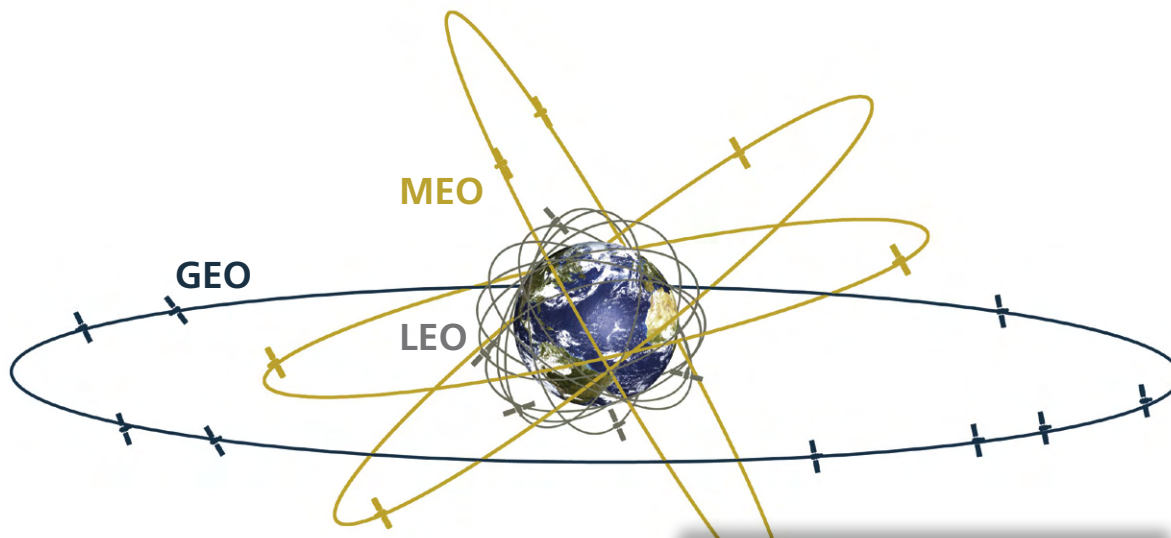
Quelle: Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt



Während des Startes der Trägerrakete und der Flugphase in den Weltraum sind die GRACE-Satelliten fest am Trägermodul BREEZE befestigt. Nach dem Absprengen der Raketenhülle bringt BREEZE die Satelliten in die eigentliche Flughöhe, wo sie schließlich vom Modul abgelöst werden. Diese Animation zeigt den Moment, in dem die Satelliten „freigelassen“ werden.

Quelle: EUKOKOTI Projektbüro Grace

Die daraus entstehenden Abstandsänderungen der baugleichen Zwillingssatelliten werden mit hoher Genauigkeit laufend überwacht und dann für die exakte Bestimmung der Bahnstörungen bzw. letztendlich für die Vermessung der Feinstruktur des Erdschwerefelds genutzt. Neben der Bestimmung der absoluten Position mit Hilfe von GPS (Global Positioning System), wie auch schon bei CHAMP, führte dies zu Messergebnissen, mit denen man sogar erstmals jahreszeitliche Schwankungen bzw. langfristige Veränderungen des Schwerefeldes aufdecken konnte. Das Heben und Senken ganzer Landstriche, das Abschmelzen der Antarktischen Eismasse – all das ließ sich erstmals mit Hilfe der Zwillingssatelliten direkt nachweisen.



Verschiedene Erdumlaufbahnen für Satelliten

LEO (Low earth orbit)

niedrige Erdumlaufbahn (200 - 2.000 km Höhe)
Erdbeobachtungssatelliten, z. B. CHAMP, GRACE, GOCE, Internationale Raumstation ISS

MEO (Medium earth orbit)

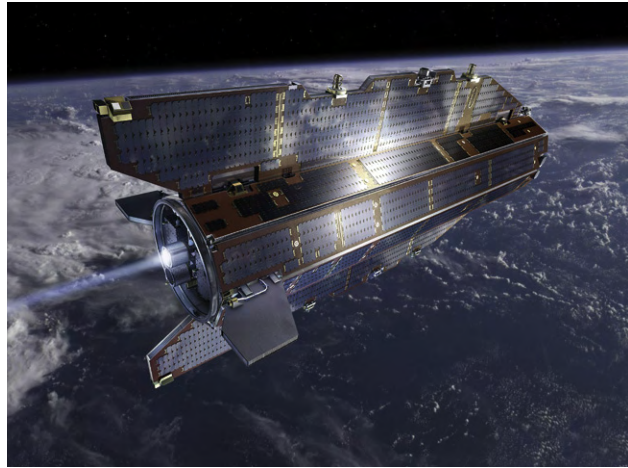
mittlere Erdumlaufbahn (ca. 20.000 km Höhe)
Navigationssatelliten z. B. GPS, Galileo

GEO (Geostationary earth orbit)

geostationäre Erdumlaufbahn
(ca. 36.000 km Höhe)
Kommunikations- und Wettersatelliten
(z. B. TV-Satelliten Astra, EUMETSAT)

HIGHSPEED UM DIE ERDE

Je höher die Umlaufbahn, desto niedriger die relative Geschwindigkeit, mit der ein Satellit unterwegs ist. Zwei Extrembeispiele sollen dies verdeutlichen: Innerhalb des „Low Earth Orbit“ (LEO) zwischen 200 und 2.000 Kilometern Höhe, in dem früher Space Shuttles und heute noch die Internationale Raumstation ISS, Spionagesatelliten und eben Erdbeobachter wie GOCE unterwegs sind, benötigt man nur maximal 5 Stunden für einen Umlauf. Die Astronauten an Bord der ISS umrunden genau wie GOCE alle 90 Minuten den Planeten, ihre Reisegeschwindigkeit in 300 Kilometern Höhe beträgt stattliche 28.000 km/h. Viel weiter entfernt von der Erde, im Bereich des „Geostationären Orbits“, geht alles etwas gemächlicher voran. Hier betragen die Bahngeschwindigkeiten weniger als 10.000 km/h und die Umlaufzeiten 24 Stunden. Die Satelliten, die hier fliegen, benötigen also genau so lange für eine Runde wie die Erde für eine Drehung. Sie schweben daher immer über dem gleichen Punkt der Erdoberfläche, sind also „geostationär“. Das ist extrem praktisch zum Beispiel für TV-Satelliten. Erdbeobachter wie GRACE oder GOCE, die ja gerade viel von der Erde zu Gesicht bekommen beziehungsweise die Schwerkraft so stark wie möglich spüren sollen, wären hier vollkommen fehl am Platze.



Animation des Satelliten GOCE im Weltraum. Das Bild zeigt die sonnenzugewandte Seite des Satelliten, die mit (spiegelnden) Solarpanelen bedeckt ist. Der Satellit selbst fliegt auf einer so genannten sonnensynchronen Umlaufbahn. Dies bedeutet, dass er mit dem Solarpanelen immer nach der Sonne ausgerichtet ist.

Quelle: AOES Medialab/ESA

So erfolgreich CHAMP und GRACE waren, die Evolution in der Satellitentechnik ging weiter. Im März 2009 startete der „Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer“, kurz GOCE, in die nahe Erdumlaufbahn. Die Gravitationskraft der Erde - und damit auch die Schwankungen derselben, nimmt ab, je weiter man sich von der Erde entfernt. Deshalb muss GOCE, genau wie sein Vorfahr GFZ-1, relativ niedrig fliegen, um ein möglichst großes Signal empfangen zu können. Fliegt er aber zu niedrig, wird der Luftwiderstand in der dichter werdenden Atmosphäre zum Problem. Als Kompromiss entschied man sich für eine vergleichsweise niedrige Flughöhe von nur 250 Kilometern.

GOCE sollte die Präzision der GRACE-Zwillinge bei der Vermessung des Geoids sogar noch übertreffen. Der Satellit nutzt dazu ein neuartiges Messprinzip: Er misst die Gravitation der Erde mit einem hochempfindlichen Instrument, dem so genannten Gradiometer. Diese Anordnung von insgesamt sechs Beschleunigungsmessern erfasst beim Überfliegen eines bestimmten Erdpunktes schon kleinste Änderungen des Schwerfelds. Dabei wird die genaue Position von GOCE, wie bei CHAMP und GRACE, durch hochpräzise Auswertung der GPS-Signale bestimmt. Durch die Kombination dieser beiden Verfahren kann der Satellit bei einer räumlichen Auflösung von 100 Kilometern Unterschiede im Wert der Erdbeschleunigung erfassen, die 1 Million Mal kleiner sind als jene 9,81 Meter pro Sekunde zum Quadrat, die wir im Alltag erfahren.

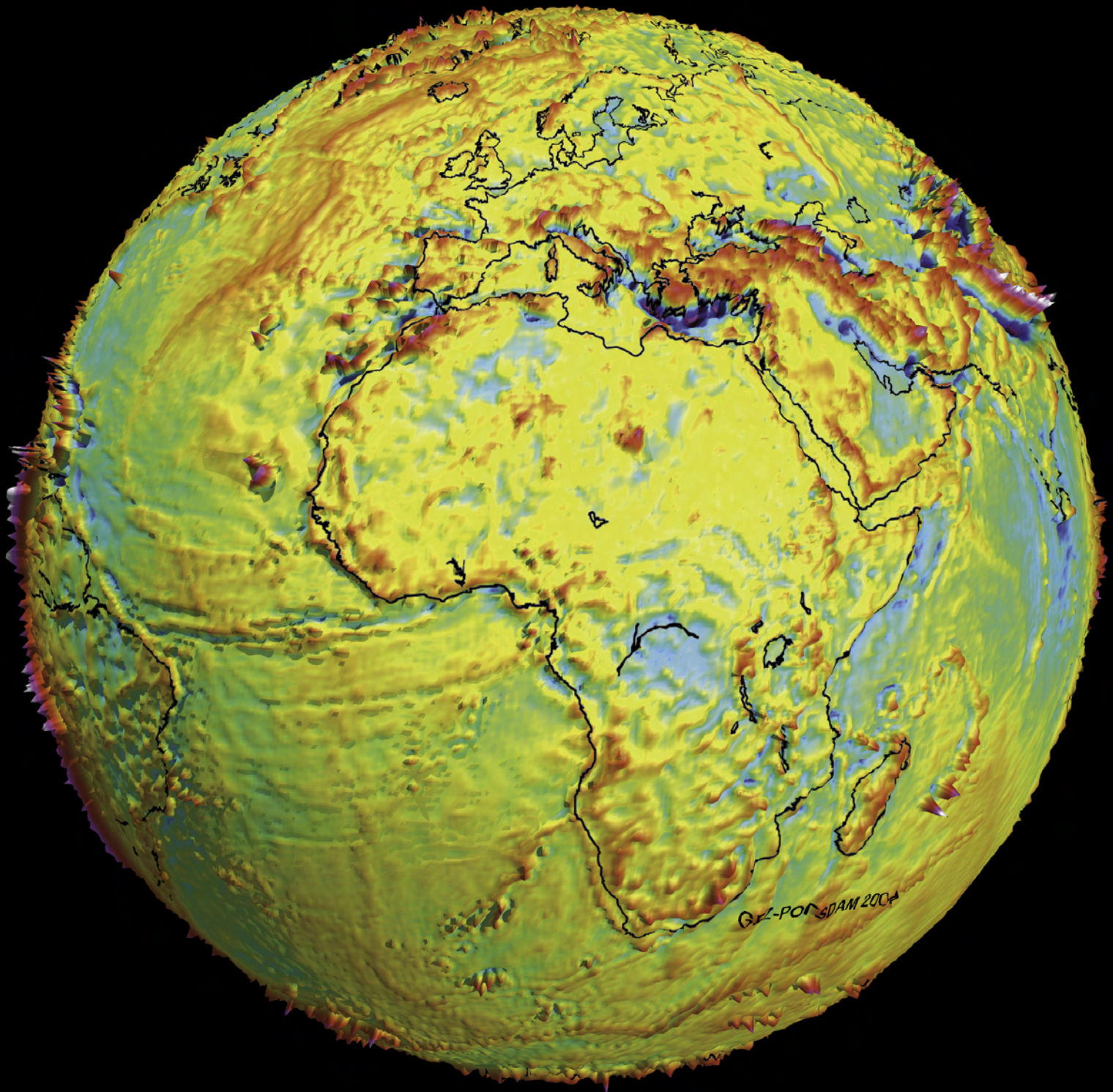
Diese extreme Messempfindlichkeit kann schnell gestört werden. Kleine Effekte, die bei anderen Messungen gar nicht ins Gewicht fallen, können bei GOCE

schnell zum Problem werden. Erschwerend kommt seine geringe Flughöhe hinzu. Damit Messergebnisse nicht verfälscht werden, muss im Satellitenkörper das Gradiometer von allen anderen Effekten abgeschirmt werden, die außer der Gravitation einen Einfluss auf die Beschleunigung haben könnten. Daher gibt es keinerlei bewegliche Teile im Satelliten. Ein komplexes Ausgleichssystem kompensiert per Zündung des Ionentriebwerks alle Störbeschleunigungen, etwa die durch die Luftreibung oder den Strahlungsdruck der Sonne. Selbst Verformungen der Bauteile durch Temperaturschwankungen wirken sich auf die Messinstrumente aus. Und so muss GOCEs Körpertemperatur genau geregelt werden. Das Gradiometer selbst sitzt dazu in einer eigenen kleinen „Klimazone“, deren Arbeitstemperatur während eines Messpunktes nicht stärker schwanken darf als um ein tausendstel Grad Celsius.

Über 8 Jahre Vorbereitungszeit stecken in dieser Mission. Aber am Ende hat sich die Mühe gelohnt: Als logische Fortsetzung der Missionen CHAMP und GRACE zeichnete GOCE noch einmal ein sehr viel genaueres Bild des mittleren Geoids und damit der Schwereanomalien, die die wahre, aber unsichtbare Figur der Erde bestimmen.



*Nach den letzten Tests wird der Satellit GOCE für den Transport nach Plesetsk (Russland) vorbereitet.
Quelle: Raumfahrer.net/ESA*



Erst
Erfassen,
dann
Auswerten

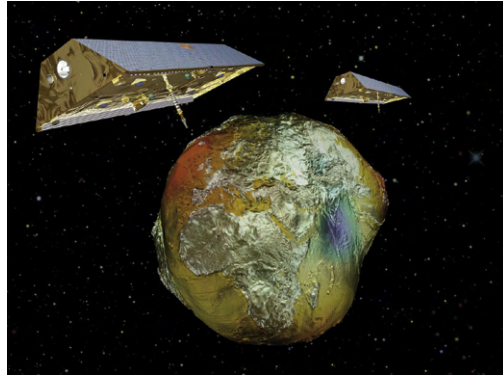
Mindestens genauso wichtig wie die Sammlung der Daten mittels Satelliten ist die Auswertungsarbeit danach. Aus den gewaltigen Datensätzen müssen Informationen über das Schwerefeld erst gewonnen werden. In ihnen stecken Antworten auf viele drängende Fragen.

Wenn der Satellit und seine Instrumente mit Hilfe der Trägerrakete erst einmal in den Himmel abgehoben haben, ist bereits eine Menge Arbeit getan. Die größte Aufgabe steht aber erst noch bevor. Die Auswertung der Datenpakete, die Satelliten zu den Bodenstationen schicken, ist der entscheidende Schritt. Welche Aussagekraft die von den Messinstrumenten kommenden Daten wirklich haben, zeigt sich erst, nachdem die Wissenschaftler geeignete mathematische Algorithmen entwickelt haben, um Informationen aus den Datensätzen zu bekommen.

Bild links:

Diese Darstellung der Erde zeigt Variationen der Schwerkraft, errechnet aus Daten der Missionen CHAMP und GRACE sowie bodengestützter Messungen. In dieser Darstellung sind besonders regionale Unterschiede in der Schwerkraft zu erkennen, wobei rote Bereiche Regionen mit hoher und blaue Bereiche Regionen mit niedrigerer Schwerkraft darstellen.

QUELLE: GFZ Potsdam

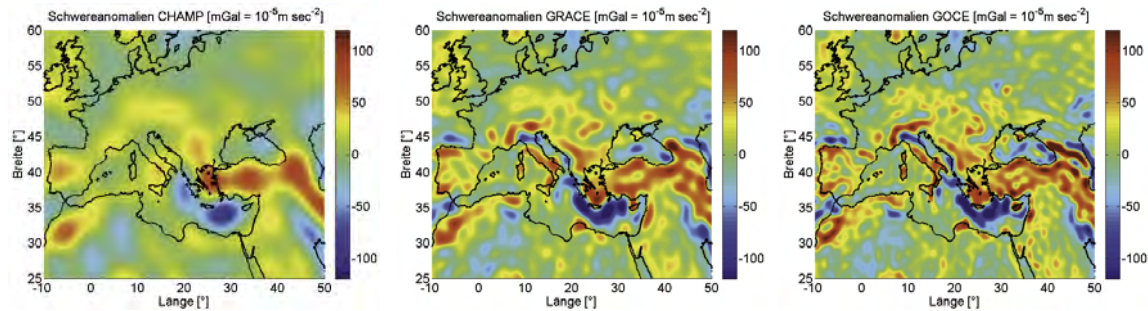


Tausendfach überhöhte Darstellung des Geoids der Erde, errechnet aus Messdaten der GRACE-Satelliten. Gezeigt werden großräumige Änderungen der Anziehungskräfte, wobei rote Bereiche Regionen mit höherer und blaue mit niedrigerer Anziehungskraft darstellen. Die Grafik (nicht maßstabsgetreu) zeigt, wie die GRACE-Satelliten in wenigen Kilometer Abstand hintereinander um die Erde kreisen und den Schwankungen der Erdanziehungskraft unterliegen.

Quelle: GFZ Potsdam

Das Grundprinzip bei der Analyse der Schwerkräftmessungen von GOCE und ähnlichen Satelliten beruht auf der sogenannten „Störungsanalyse von Satellitenbahnen“. Sie basiert, wie im letzten Abschnitt gesehen, auf der Tatsache, dass Satelliten durch die ungleichmäßige Dichteverteilung unseres Planeten nicht auf einer einfachen Keplerellipse fliegen. Die Beobachtung dieser Abweichungen ist die Grundlage der Schwerefeldberechnung und erfolgt entweder von der Erde aus mittels Lasermessungen oder direkt im Weltraum wie beispielsweise bei den Abstandsmessungen zwischen dem Satellitenpaar der GRACE-Mission.

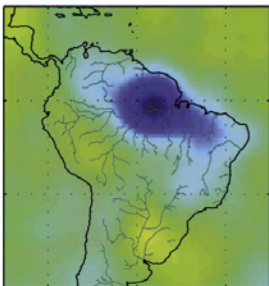
Zur Ableitung des Schwerefelds aus den Messungen wird die Bahn des Satelliten zunächst im Rechner „modelliert“. Erforderlich sind dazu genäherte Anfangswerte für den Ort und die Geschwindigkeit des Satelliten und alle bekannten Störkräfte, die auf ihn wirken. Diese Störkräfte sind teilweise „gravitativ“ (z.B. verursacht durch das Schwerefeld der Erde, des Mondes oder der Sonne) und teilweise „nicht-gravitativ“ (z.B. verursacht durch die auch in 500 Kilometer Flughöhe noch vorhandene Abbremsung der Satelliten durch die Restatmosphäre). Man setzt also alle Störkräfte ein, einen Startpunkt und eine Startzeit und lässt den Satelliten dann virtuell im Computer seine Bahnen ziehen. Durch Variation der Anfangswerte für Ort und Geschwindigkeit erhält man schließlich für einen bestimmten Zeitraum, typischerweise 24 Stunden, eine an die Bahnbeobachtungen am besten angepasste Bahn. Die Abweichungen, die jetzt noch zwischen der modellierten Bahn und der real geflogenen bestehen, enthalten schließlich die gesuchten Gravitationsparameter.



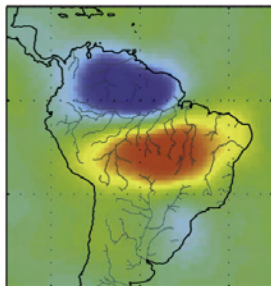
*Der Vergleich der Schwerefeldmessdaten der Satelliten CHAMP (links), GRACE (Mitte) und GOCE (rechts) zeigt, wie sehr sich die Auflösung der Daten und somit die Qualität der Messungen verbessert hat. Diese Verbesserung spiegelt sich in einer deutlichen Steigerung der Detailgenauigkeit wider. Das Beispiel zeigt Europa und das Mittelmeer.
Quelle: Universität Bonn*

Schwerefeldmodelle, so wie sie von Experten aus den Messungen von CHAMP, GRACE und GOCE berechnet werden, spiegeln die Dichteverteilungen unserer Erde wider, vom Erdkern bis zu den Prozessen an der Landoberfläche, in den Ozeanen und in der Atmosphäre. Weil sich die Dichtemuster mit zunehmender Tiefe der Massenverteilung aber nur stark abgeschwächt im Schwerefeld abzeichnen, müssen sie mit aufwendigen mathematischen Verfahren rekonstruiert werden. Beim Blick ins Erdinnere muss man dazu auf Dichteinformationen zurückgreifen, die durch das Aussenden von künstlich angeregten seismischen Wellen in den Untergrund gewonnen wurden. Konzentriert man sich eher auf die oberen Bereiche der Erdkruste und die Oberfläche, so lassen sich Massenverteilungen beziehungsweise deren zeitliche Änderung zum Beispiel aus GRACE-Daten bis zu einer räumlichen Auflösung von etwa 300 Kilometer direkt bestimmen. In der rechnerischen Auswertung der Daten müssen dabei allerdings sekundäre Effekte wie etwa das Durchbiegen der Erdkruste unter der Last der Massenströme, was selbst wieder zu einer Änderung des Schwerefelds führt, berücksichtigt werden. Auch das Anheben einiger Landmassen, das seit dem Rückgang der Gletscher am Ende der letzten Eiszeit andauert und das Schwerefeld beeinflusst, müssen die Experten berücksichtigen. Eine wahre Sisyphusarbeit.

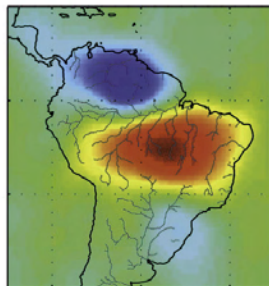
Jan. 2004



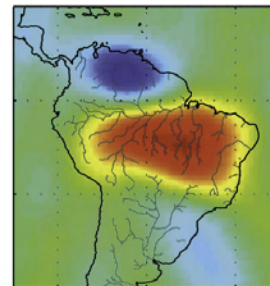
Feb. 2004



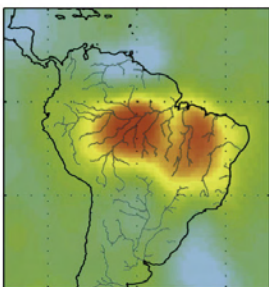
Mar. 2004



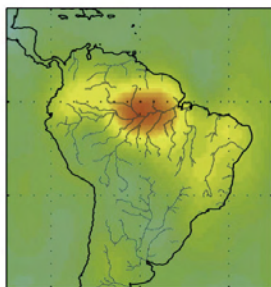
Apr. 2004



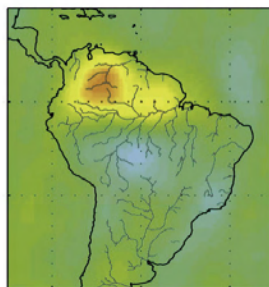
May 2004



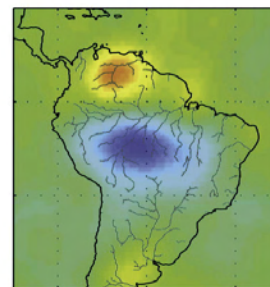
Jun. 2004



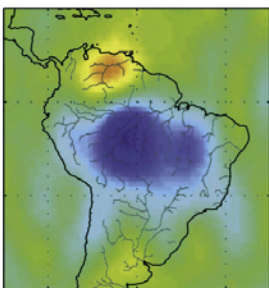
Jul. 2004



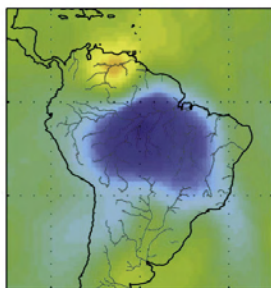
Aug. 2004



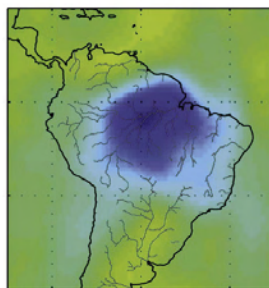
Sep. 2004



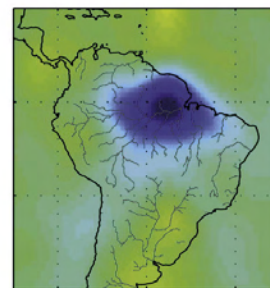
Oct. 2004



Nov. 2004



Dec. 2004



Gemacht für die **Anwendung**

Die Daten, die bei Schwerefeldmessungen gesammelt und ausgewertet werden, sind heiß begehrt. Anwendung finden sie in vielen unterschiedlichen Bereichen, vom Ingenieurwesen bis zur Klimaforschung.

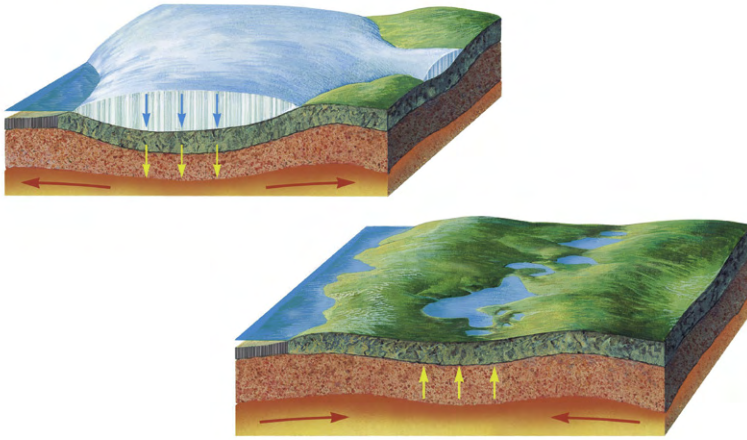
Stellt man das Gravitationsfeld der Erde in Form des Geoids zu einem bestimmten Zeitpunkt dar, so erkennt man seine Dellen und Ausbuchtungen – Schwereanomalien, ausgelöst durch gewaltige Gebirgsmassive wie den Anden und dem Himalaya, durch das Absinken von Erdplatten an Kontinentalrändern oder das Aufwölben der Erdkruste durch Materialströme des Erdmantels. Vergleicht man nun viele dieser Schnappschüsse des Geoids miteinander, so zeigt sich, dass dieser ständig im Wandel begriffen ist. Neben der räumlichen gibt es auch eine „zeitliche Variabilität“ des Schwerefelds.

Das spezielle Messprinzip der GRACE-Mission, die kontinuierliche und hochgenaue Beobachtung der Abstandsänderung zwischen zwei Zwillingssatelliten, machte es zum ersten Mal möglich, auch diese

Bild links:

Die Veränderung der Schwerkraft über dem Amazonasgebiet (gemessen mit den GRACE-Satelliten im Verlauf eines Jahres) zeigt, wie sich der Wasserhaushalt des weltweit größten Regenwaldgebietes verändert. In den Monaten Februar bis Juni kommt es im mittleren Amazonasbecken zu starken Regenfällen. Das zusätzlich in der Region befindliche Wasser lässt die Anziehungskraft im Vergleich zum Jahresmittel deutlich steigen (rote Farben). Hierbei spielt zum einen die Masse des Wassers, zum anderen die nach Regenfällen anwachsende Biomasse eine entscheidende Rolle. Fällt dann über Monate nur noch wenig Regen, so verringert sich die Anziehungskraft wieder. Teilweise kommt es sogar durch den Abfluss von Wasser über den Amazonas und seine Nebenflüsse zu einer Verringerung der Anziehungskräfte gegenüber dem Jahresmittelwert (blaue Farben).

Quelle: Uni. Texas/ GFZ Potsdam/ NASA

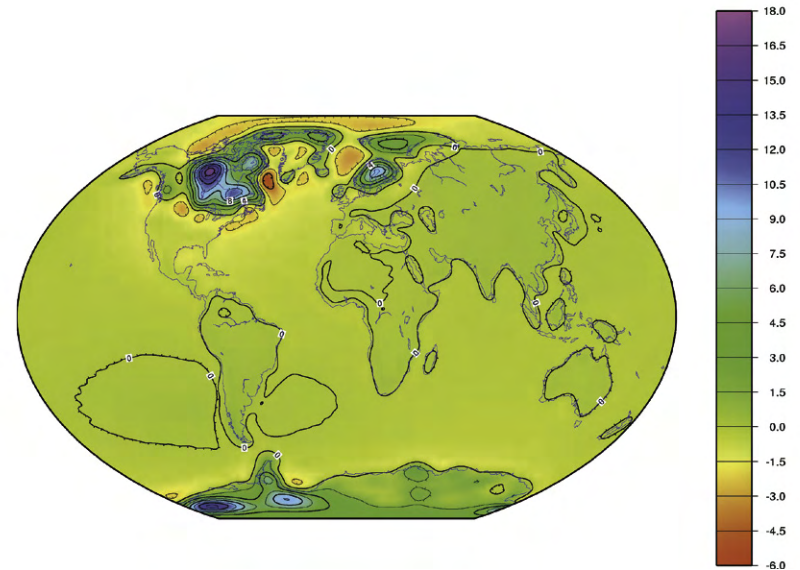


Während der letzten Eiszeit bildeten sich gewaltige Gletscher, die mit ihrem Eigengewicht in der Lage waren, ganze Regionen in die Tiefe zu drücken. Nachdem das Eis dieser Gletscher geschmolzen ist, können die Landmassen wieder ihre ursprüngliche Position einnehmen - ein Prozess, der auch heute noch anhält. Die Bewegung, die postglaziale Hebung genannt wird, zeigt sich unter anderem in Veränderungen der Schwerkraft einer Region.

Quelle: G. Hincks/Science Photo Library

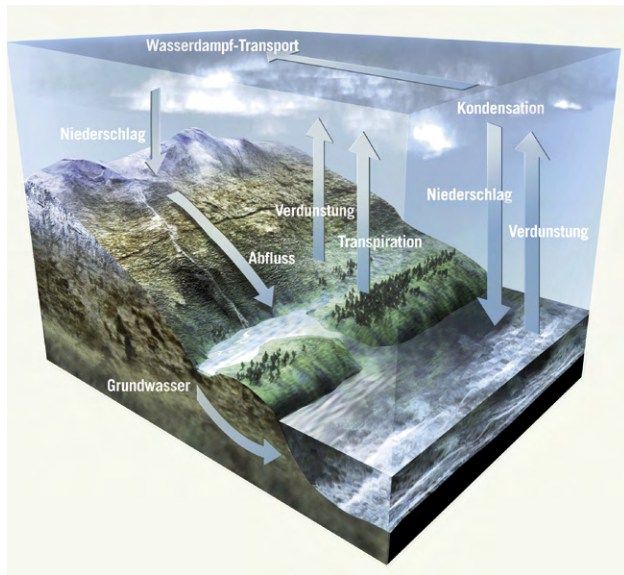
zeitlichen Veränderungen im Schwerfeld unseres Planeten zu beobachten. Neben dem statischen, zeitlich unveränderlichen Anteil, wie er z.B. durch GOCE hochpräzise vermessen wird, zeigen sich in den GRACE-Daten auch extrem kleine, aber signifikante zeitliche Veränderungen der Erdbeschleunigung bis in die sechste Nachkommastelle. So werden nicht nur abrupte Veränderungen im Schwerfeld sichtbar, wie sie z.B. durch große Erdbeben wie im Dezember 2004 in Indonesien verursacht wurden, sondern auch saisonal innerhalb eines Jahreszyklus wie sie beispielsweise durch Veränderungen im Wasserkreislauf großer Flusssysteme verursacht werden. Auch Rückschlüsse auf den Erdkörper selbst lassen Messungen des zeitvariablen Schwerfelds zu. So spiegeln die Daten beispielsweise nicht nur die regelmäßig wiederkehrenden Fluten im Amazonasbecken oder in Bangladesch wider, sondern eben auch die Reaktion der Erdkruste auf diese großen Massenverlagerungen. Naturwissenschaftler erkennen in den Daten zum zeitvariablen Schwerfeld also nicht nur die Verschiebung der Wassermassen, sondern auch wie stark die Erdkruste unter diesen Änderungen nachgibt.

Aber nicht nur relativ kurze Ereignisse wie Erdbeben oder Fluten zeigen sich in den Daten, sondern auch langfristige Trends wie etwa Eismassenveränderungen in der Westantarktis, Grönland, Westalaska oder im Himalaya. Zu den spektakulärsten Ergebnissen der GRACE-Mission zählt die Erfassung der Beiträge der großen Eisschilde und Gletscher zum Meeresspiegelanstieg. So weiß man dank der Auswertung der Schwerefelddaten heute, dass allein der grönländische Eisschild, nach der Antarktis der zweitgrößte der Erde, derzeit circa 230 Milliarden Tonnen pro Jahr (Gt/a) an Masse verliert – eine Menge, die damit einem Anstieg des Meeresspiegels von etwa 0,6 Millimeter jährlich entspricht. Für das Zurückweichen aller Gletscher der Welt (ohne Grönland und Antarktis) kommt man auf einen etwa vergleichbaren Betrag von 210 Gt/a. Der westantarktische Eisschild steuert weitere 90 Gt/a bei, während der ostantarktische Eisschild derzeit relativ stabil erscheint. All diese Werte schwanken allerdings saisonal und auf längeren Zeitskalen. Noch ist die Länge der Zeiträume, über die Daten vorliegen, nicht ausreichend, um eine Beschleunigung oder Zunahme der Trends statistisch gesichert abzuleiten.



Die vertikale Bewegung der Erdkruste in Millimeter pro Jahr. Gut zu erkennen ist, dass die Regionen, die in der letzten Eiszeit mit riesigen Gletschern bedeckt waren (besonders das westliche Kanada und Skandinavien), auch nach über 12.000 Jahren noch Ausgleichbewegung von bis zu 18 Millimeter pro Jahr ausführen.

Quelle: Paulson, A., S. Zhong, and J. Wahr, Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data, Geophys. J. Int. (2007) 171, 497–508



Wasser wird über zahlreiche Prozesse ständig auf der Erde umverteilt. Um die im Wasserkreislauf der Erde transportierten Mengen bestimmen zu können, werden Messungen von Satelliten benötigt. Steigt zum Beispiel nach extremen Niederschlägen das Grundwasser im Boden, so erhöht es aufgrund seiner Masse die Schwerkraft der Region. Fließt das Wasser wieder ab, so sinkt auch die Schwerkraft. Diese Erkenntnisse helfen unter anderem dabei, bessere Klimaprognosen zu erstellen.

Quelle: AOES Medialab/ ESA

Trotz immenser Fortschritte in der Klimaforschung sind gerade Prognosen des Meeresspiegels für das 21. Jahrhundert mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies liegt zum Teil daran, dass viele mit diesem Thema verbundene Prozesse noch nicht hinreichend verstanden sind. Die Instabilitäten der Eisschilde sind ein wichtiges Beispiel dafür: Niemand kann garantieren, dass die heutigen Schmelzraten in einem sich verändernden Klima, insbesondere bei sich erwärmenden Ozeanen, konstant bleiben. Die Satellitenmessungen liefern hier einen wichtigen Beitrag, um Prozesse der Kryosphäre, also der von Eis und Schnee bedeckten Oberfläche unseres Planeten, besser zu verstehen und damit auch die Fähigkeit zu verbessern, robuste Prognosen zu erstellen.

Die globale Erwärmung, sich verändernde Niederschlagsmuster oder auch großräumige Veränderungen der Landoberfläche durch den Menschen tragen zur Veränderung des Wasserkreislaufes bei und – zumindest der Meinung einiger Wissenschaftler nach – zu häufigeren und schwereren Extremereignissen. Wasser ist an der Erdoberfläche in unterschiedlichen Formen gespeichert – als Schnee und Eis, im Inneren der Vegetation, gesammelt in Seen, im Boden und als Grundwasser. Allerdings ist es schwierig, die jeweiligen

Wassermengen und ihre zeitliche Veränderung über hunderte von Kilometern hinweg mit traditionellen Verfahren zu erfassen. Und genau hier kommt GRACE ins Spiel. Aus den Datenmengen der Mission lassen sich Veränderungen innerhalb der genannten Wasserspeicher berechnen.

Als gutes Beispiel kann man hier die extensive Wassernutzung durch den Menschen aufführen, die sich aus den Schwerefelddaten aufdecken lässt. So konnte man nachweisen, dass etwa in Nordindien jedes Jahr 18 Milliarden Liter Grundwasser zur Bewässerung von Feldern eingesetzt werden, was dazu führt, dass die Grundwasserpegel hier jährlich im Mittel um 4 Zentimeter fallen. Und das kann zum Teil gefährliche Folgen haben: Fallende Grundwasserspiegel durch übermäßige Wasserentnahme lassen nicht nur Seen und Quellen trockenfallen, sie können auch zur Absenkung ganzer Landstriche führen und damit zu erhöhter Erosion, großen Erdbeben sowie der Beschädigung von Gebäuden und Infrastruktur. Betroffen sind davon neben Regionen wie den Niederlanden oder Japan auch Ballungszentren wie Bangkok oder Mexico City.

Das Beispiel zeigt: Daten, die durch Schwerefeldmessungen gewonnen werden, können sogar Einfluss auf Umweltschutz und Ressourcenbewusstsein nehmen – wenn sie durch geeignete Anwendungen Entscheidungsträgern, Politikern aber auch der Bevölkerung zuvor unsichtbare Probleme deutlich vor Augen führen.

DEN MEERESSPIEGEL IM FOKUS

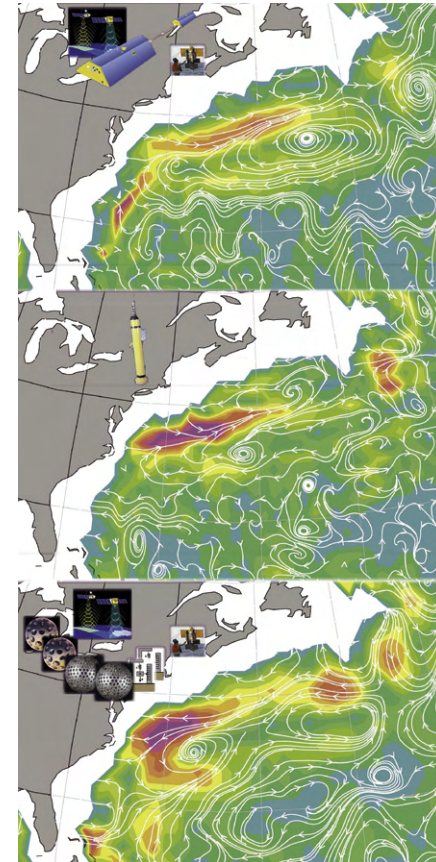
Strömungen in den Ozeanen gehen mit einer Deformation der Meeresoberfläche einher, die sich jeweils im Gleichgewicht zwischen verschiedenen Kräften, darunter Schwerkraft und Corioliskraft, einstellt. Strömungen sind also immer von einer Neigung der Meeresoberfläche begleitet. Die Gleichgewichtsfläche des Schwerefelds, das Geoid, definiert was horizontal ist und dient so als fundamentale Bezugsfläche für die Messung von Höhen und Höhenveränderungen der Meeresoberfläche. Diese Höhen können seit einigen Jahrzehnten mit Hilfe von Radarmessungen von Satelliten aus mit mm- bis cm-Genauigkeit erfasst werden. Kennt man die Form des Geoids und damit auch die Höhen über der Meeresoberfläche, „dynamische Topographie“ genannt, dann lassen sich aus dem oben genannten Kräftegleichgewicht andere Größen ableiten wie etwa Strömungsgeschwindigkeiten oder die Größenordnung stationärer Wassertransporte. Das heißt, man kann für jeden beliebigen Ort auf der Meeresoberfläche errechnen, wie viel Wasser dort pro Sekunde vorbeifließt.

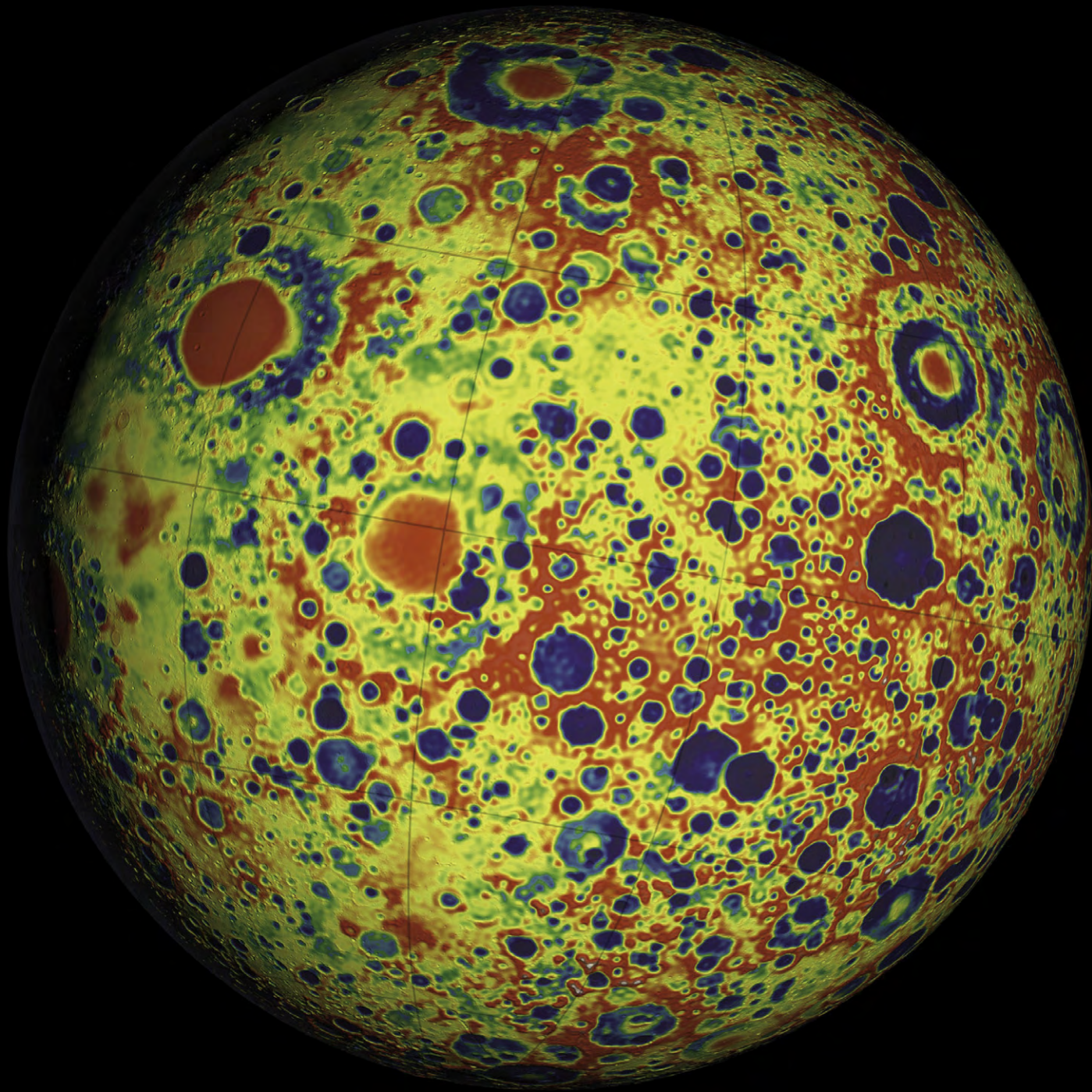
Beispiel Golfstrom: Dieser trägt warmes Oberflächenwasser in den Nordatlantik, wo es abkühlt, absinkt und in den Süden zurückfließt. Aus Satellitendaten konnten Forscher herauslesen, dass dieses gigantische Warmwasser-Förderband in Höhe des 41. Breitengrads, also knapp oberhalb von New York, 15 bis 16 Millionen Kubikmeter Salzwasser pro Sekunde mit durchschnittlich 6 Stundenkilometern in Richtung Norden pumpt. Etwaige Veränderungen dieser Nordatlantik-Zirkulation, die weitreichende Folgen für das Klima Europas haben würden, können so durch die Vermessung von Schwerefeld und Meeresoberfläche aus dem All detektiert werden.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung zeitlicher Veränderungen der Ozeanmassen aus gemessenen zeitlichen Veränderungen des Schwerefeldes liefert die „Inversion“.

Auf diese Weise konnten sowohl der Austausch großer Wassermengen zwischen verschiedenen Ozeanbecken als auch die jahreszeitlichen Schwankungen der gesamten Wassermasse der Ozeane nachgewiesen werden, die sich in bis zu 7 Millimetern Meeresspiegeländerung niederschlagen. Daraus ergeben sich dann viele weitere Parameter: Kennt man die Veränderung des Meeresspiegels und damit die des Ozeanvolumens, kann man sie mit der Änderung der Ozeanmasse, bestimmt durch die Schwerefeldmessungen, vergleichen. Beide Änderungen müssten sich in einem bestimmten Verhältnis zueinander vollziehen. Tun sie dies nicht, muss ein weiterer Faktor eine Rolle spielen, den man dann ausrechnen kann: die Ausdehnung der Ozeane durch Erwärmung und Änderungen des Salzgehalts. Kennt man wiederum diese beiden Werte und misst Temperatur und Salzgehalt der oberen Ozeanschichten, dann kann man sogar noch weitaus tiefer vordringen und auf die Erwärmung des tiefen Ozeans schließen. Ein großer Schritt, wenn man bedenkt, dass diese ganze Kette von Datenerfassungen und Berechnungen in der Erdumlaufbahn ihren Anfang nahm.

*Der Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung der im Golfstrom, entlang der Ostküste Nordamerikas, transportierten Wassermassen zeigt, dass je nach Methode unterschiedliche Daten gewonnen werden. Dabei ist zu beachten, dass Satellitendaten (oben basierend auf die GRACE-Mission, unten basierend auf älteren Daten wie GFZ-1 und ähnlichen) ein sehr weiträumiges Bild der transportierten Wassermengen zeigen, lokale Messungen mit Schwimmbojen und Pegeln (mittleres Bild) hingegen nur sehr punktuelle Daten liefern. Wie diese unterschiedlichen Methoden am besten kombiniert werden, ist zur Zeit Inhalt verschiedener Forschungsprojekte. Dargestellt sind: Landmassen= Grau, Datenlücken= Weiß, hohe Anziehungskräfte in Magenta und niedrige Anziehungskräfte in Türkis
Quelle: Woods Hole Institute of Oceanography/JPL/ NASA/Uni. Texas*





Blick in die Zukunft

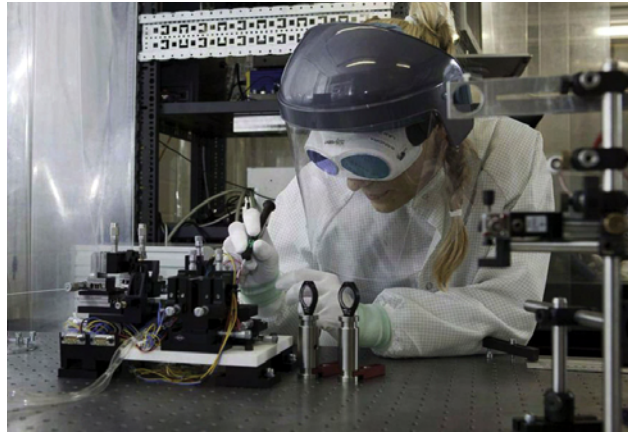
Geoforschung und Satellitentechnologie haben sich in den letzten Jahrzehnten rasant entwickelt. Doch was kommt in Zukunft? Welche Aufgaben warten auf die Geowissenschaften?

Auch nach der erfolgreichen Missionsserie CHAMP–GRACE–GOCE geht es mit der Satellitengravimetrie weiter. Wie die GRACE-Mission gezeigt hat, ändert sich die Massenverteilung im System Erde kontinuierlich. Die Satellitengravimetrie ist als einzige Fernerkundungsmethode in der Lage, solche Massenumverteilungen über längere Zeiträume hinweg zu verfolgen. Dass das langfristige Beobachten des „Erdgravitationszustandes“ u.a. für die Klimaforschung sehr wichtig ist, wurde nicht nur von den verschiedenen erdwissenschaftlichen Disziplinen schon früh erkannt, sondern auch von den Verantwortlichen der großen Raumfahrtbehörden und Forschungseinrichtungen, allen voran den Betreibern der GRACE-Satelliten wie das Deutsche GeoForschungsZentrum oder das amerikanische Jet Propulsion Laboratory. So ist es auch nur naheliegend, dass bereits mit der Planung einer Nachfolgemission begonnen wurde.

Bild links:

Dieses Bild zeigt das Schwerefeld des Mondes, vermessen durch die Satellitenmission GRAIL. Regionen mit einer geringeren Anziehungskraft sind in Blau, Regionen mit höherer Anziehungskraft in Rot dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass besonders die Meteoritenkrater eine geringere Anziehungskraft aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass der Mond eine dicke Kruste besitzt (etwa 40 Kilometer mächtig). Wissenschaftler wollen in Zukunft auch das Schwerefeld anderer Himmelskörper untersuchen. Sie erhoffen sich so zum Beispiel Informationen über den Aufbau von Planeten, Monden oder Asteroiden.

Quelle: NASA/ JPL/ MIT/ GSFC/ SVS



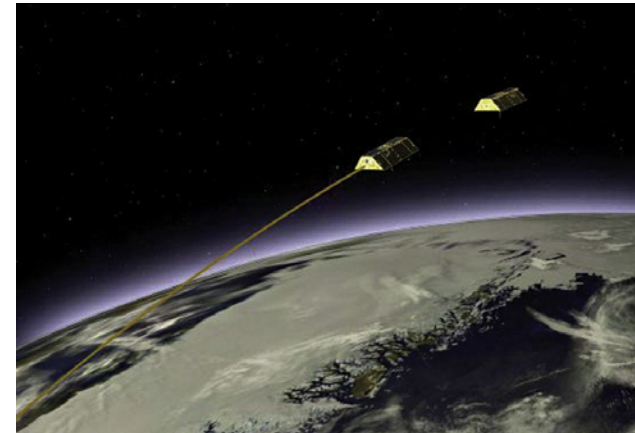
*Die Entwicklung von optischen Komponenten des neuartigen Laserdistanzmessers für den Einsatz im Rahmen der geplanten GRACE-FO-Mission findet unter anderem am Laser Zentrum Hannover statt.
Quelle: T. Damm/QUEST*

Rund 10 Jahre nach dem Start von GRACE hat im Herbst 2012 das sogenannte GRACE Follow-On Projekt, kurz GRACE-FO, grünes Licht erhalten. Um Entwicklungskosten und -zeit zu sparen, basiert der Satellitenentwurf weitgehend auf dem bestehenden GRACE-Konzept. Eine wichtige Neuerung ist aber, dass die Distanz zwischen den Satelliten jetzt nicht mehr nur mittels Mikrowellentechnik gemessen wird, sondern dass zusätzlich ein experimenteller, wesentlich genauerer Laserdistanzmesser zum Einsatz kommt. GRACE-FO wird voraussichtlich im Sommer 2017 zu seiner Mission starten.

Die Relevanz der Satellitengravimetrie für die Erforschung unserer Erde kann auch daran gemessen werden, dass die Raumfahrtbehörden ESA und NASA schon über den GRACE-FO Zeitraum hinaus planen. Und nicht nur sie: Auch das Chinesische Raumfahrtprogramm sieht bereits eine Schwerefeldmission vor. Begleitet werden all diese Planungen durch unzählige nationale und internationale Studien, die zukünftige Missionskonzepte auf Herz und Nieren überprüfen. Dabei zeigen sich vor allem zwei Hauptprobleme: Zum einen ist das sogenannte Signal-Rausch-Verhältnis, also die Qualität des gemessenen Signals vor dem Hintergrund

unterschiedlichster Störgeräusche, in der Satellitengravimetrie eher ungünstig. Eine zeitliche Änderung des Gravitationsfeldes führt beispielsweise bei GRACE nur zu winzigen Änderungen der Distanz zwischen beiden Satelliten, wodurch bisher nur Zeitvariationen des Gravitationsfeldes beobachtet werden konnten, die sich auf relativ großen Skalen abspielen. Zum anderen ändert sich das Schwerefeld der Erde, z.B. durch die Gezeiten, oft schneller als es vom Orbit aus beobachtet werden kann. Ein Satellit wie GOCE umkreist auf seiner niedrigen Umlaufbahn den Erdball 16 Mal pro Tag; extrem kurzfristige Schwankungen der Erdbeschleunigung können so nur unsauber erfasst werden und verfälschen am Ende sogar die Missionsergebnisse.

Studien im Bereich der Satellitengravimetrie müssen sich mit diesen Problemen auseinandersetzen. Wie kann man die Satellitenbahnen so optimieren, dass der Erdball präziser abgetastet wird? Und gibt es vielleicht noch andere Formationen außer der des GRACE-Tandems, in denen Satelliten die Erde unrunden könnten? Neben technischen Fragen drehen sich die Studien aber auch um das Thema internationale Zusammenarbeit. Wenn viele verschiedene Raumfahrtagenturen ihre eigenen Schwerefeldmissionen planen, könnte man



Während der gesamten Missionsdauer werden die hochpräzisen Messungen der GRACE-FO-Satelliten alle 30 Tage ein aktualisiertes Modell des Erdgravitationsfeldes liefern. Außerdem erstellt jeder der beiden Satelliten (wie schon CHAMP und GRACE) täglich bis zu 200 Profile durch die Ionosphäre und die Atmosphäre, woraus Temperaturverteilung und Wasserdampfgehalt für die Wettervorhersage abgeleitet werden können.
Quelle: ASTRIUM



Neben dem Schwerefeld steht auch das Magnetfeld der Erde im Zentrum aktueller Satellitenmissionen. So wird die Mission SWARM, bestehend aus drei baugleichen Satelliten, neue Daten zu Schwankungen des Magnetfeldes der Erde liefern können.

Quelle: ASTRIUM

doch die Konfiguration der Umlaufbahnen ihrer Satelliten aufeinander abstimmen.

Schaut man sich Studien, Zwischenergebnisse und Konzepte an, wie sie die ESA, NASA, deutsche Großforschungseinrichtungen wie DLR oder GFZ oder die chinesische CNSA in den letzten Jahren entwickelt haben, dann kristallisiert sich bereits ein Bild heraus, wie die Satellitengravimetrie der nächsten Generation aussehen könnte. Es werden vermutlich, genau wie bei GRACE und GRACE-FO, zwei Satelliten pro Mission sein, die als Tandem fliegen und die Erdbeschleunigung mittels Lasermessung ihrer Relativedistanz zueinander ermitteln.

Um dabei die Signalstärke zu optimieren, müsste man ähnlich wie bei GOCE, eine möglichst niedrige Umlaufbahn finden, auf der der Satellit stabil über einen längeren Zeitraum messen kann. Anbieten würde sich wieder eine Bahn innerhalb des LEO, des „Low Earth Orbit“, in 350 Kilometern Höhe.

Die Schwerefeldmissionen der Zukunft werden vielleicht auch nicht mehr nur auf ein Satellitenpaar setzen, sondern modular aufgebaut sein. Mehrere Einzelmissionen, durchaus auch von unterschiedlichen Raumfahrtagenturen und Nationen gestartet, könnten nach dem Baukastenprinzip im All zu einer optimalen Gesamtkonfiguration vereint werden, die so viel variabler einzelnen wissenschaftlichen Aufgaben

angepasst werden könnte. So könnten zwei Satellitenpaare zu einer Mission verkoppelt werden, um sowohl eine hohe räumliche als auch zeitliche Auflösung zu erreichen. Das eine Satellitenpaar würde wie bei GRACE auf einer Umlaufbahn über die Pole fliegen, während die Erde sich unter ihm wegdreht. Nach relativ kurzer Zeit überfliegt dieses Satellitenpaar die gleichen Punkte der Erdoberfläche – gut optimal zur Erfassung schneller zeitlicher Veränderungen des Schwerefelds. Für eine hohe räumliche Auflösung würde das zweite Tandem sorgen, das mit einer geringeren Bahnneigung ausgestattet wesentlich engmaschiger die Erde überstreichen, dafür aber einen wesentlich größeren „Wiederholungszyklus“ aufweisen würde. Die Erforschung des Geoids könnte mit Konzepten wie diesen eine ganz neue Dimension erreichen und damit viele neue Einblicke liefern, in die gewaltigen Umwälzprozesse des Erdmantels genau wie in die komplexen Vorgänge in den Tiefen der Ozeane oder in die Dynamik des Klimahaushalts.



Formationsflüge, also Satellitenmissionen mit mehreren baugleichen Flugkörpern, können die Genauigkeit der Messungen erheblich verbessern. Forscher denken sogar darüber nach, in Zukunft Missionen mit zehn, hundert oder mehr Satelliten zu fliegen. Dies wird möglich, da auch im Satellitenbau der Trend zur Miniaturisierung zu erkennen ist. Auf diesem Foto, das aus der Internationalen Raumstation heraus gemacht wurde, sind drei solcher Mini-Satelliten (Würfel mit etwa 10 Zentimeter Kantenlänge) zu erkennen: FITSat1, F-1 und TechEdSat.

Quelle: ISS-33/NASA



GEOTECHNOLOGIEN ist ein geowissenschaftliches Forschungs- und Entwicklungsprogramm und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

In interdisziplinären Verbundprojekten zwischen Wissenschaft und Wirtschaft werden neue Konzepte zur Nutzung der Erde und zum Schutz der auf ihr lebenden Menschen entwickelt.

Der Themenschwerpunkt „Beobachtung des Systems Erde aus dem Weltraum“ wurde im Rahmen des GEOTECHNOLOGIEN Programms von 2001 bis 2012 gefördert.

Vom Koordinierungsbüro GEOTECHNOLOGIEN wurde eine Ausstellung konzipiert, die einige Anwendungsbeispiele der Fernerkundung deren Alltagsrelevanz und die Bedeutung von technologischen Neuerungen bei Satelliten und Messmethoden anschaulich erklärt. Die seit Sommer 2010 an verschiedenen Standorten in Deutschland gezeigte Ausstellung, mit dem Titel „Die Erde im Visier“, wird ab März 2014 als Dauerausstellung in der Sternwarte in Bochum zu sehen sein.

Weitere Informationen zur Ausstellung unter: www.die-erde-im-visier.de

IMPRESSUM

Wissenschaftliche Beratung

Prof. Dr.-Ing. Frank Flechtner, Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Kusche, Universität Bonn

Prof. Dr. Wolf-Dieter Schuh, Universität Bonn

Prof. Dr.-Ing. Nico Sneeuw, Universität Stuttgart

Texte

Timo Meyer

iserundschmidt, Kreativagentur für PublicRelations GmbH

Redaktion

Simon Schneider

Alexandra Scherer

Layout/Design

Corinna Kallich



1. Auflage 2013

Druck: Druckerei Arnold, Großbeeren

Kontakt

Dr. Ute Münch

Koordinierungsbüro
GEOTECHNOLOGIEN

Telegrafenberg
14473 Potsdam
Tel + 49 (0) 331 · 288 10 71

info@geotechnologien.de
www.geotechnologien.de





Koordinierungsbüro
GEOTECHNOLOGIEN

Telegrafenberg
14473 Potsdam

Tel + 49 (0) 331 · 288 10 71

info@geotechnologien.de
www.geotechnologien.de