

Die Satellitenmission GOCE – Geodäsie aus dem Weltraum*



Reiner Rummel

GOCE ist der erste Satellit des neu definierten erdwissenschaftlichen Programms »Living Planet« der Europäischen Raumfahrtagentur ESA. Der Start erfolgte am 17. März 2009 mit einer russischen Trägerrakete von Plesetsk aus. Ziel dieser Mission ist die möglichst detailgenaue Vermessung des Gravitationsfelds der Erde. Die Bestimmung des Erdschwerefelds gehört zu den wissenschaftlichen Aufgaben der Geodäsie; sie ist unzertrennlich verbunden mit der Ermittlung der Erdfigur.

Die Abkürzung GOCE steht für »Gravity and steady-state Ocean Circulation Explorer«. Bild 1 zeigt das Innenleben des Satelliten. Die Mission wurde hauptsächlich von Geodäten vorangetrieben und auch heute liegt die Auswertung der Messdaten überwiegend in Händen der Geodäsie. Zudem wird das Projekt wichtige Daten für die Geodäsie liefern. Die wissenschaftlichen Ziele liegen jedoch primär auf den Gebieten der Ozeanographie und Geophysik. Dies unterstreicht die Tatsache, dass die Geodäsie heute sehr relevante Beiträge für die Erdwissenschaften im Allgemeinen und für die Klimaforschung im Besonderen liefert.

Es sei noch ergänzend darauf hingewiesen, dass inzwischen zwei weitere Satelliten des ESA-Programms »Living Planet« gestartet wurden. Am 2. November 2009 wurde die Mission SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) in ihre Umlaufbahn gebracht, SMOS misst die Bodenfeuchte und über den Ozeanen den Salzgehalt. CRYOSAT wurde am 7. April 2010 gestartet, dieser Satellit vermisst mit einem neuartigen Altimetermesssystem die Höhenveränderungen der Eiskappen und des Meereises.

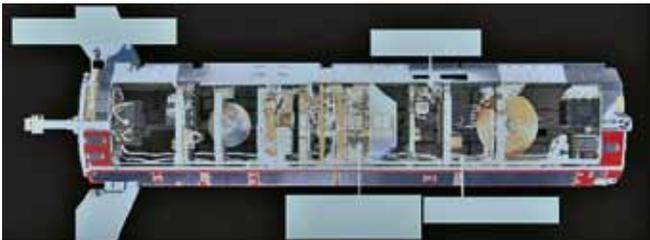


Bild 1: Das Innenleben des Satelliten GOCE – Im Zentrum das Gravitationsgradiometer, daneben rechts die Sternsensoren und der GPS-Empfänger europäischer Bauart (Quelle: ESA)

* Dieser Aufsatz erscheint gleichzeitig im Kapitel 4 »Geodäsie im Internationalen Umfeld« des Buches »Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen – 2010«, herausgegeben von Klaus Kummer und Josef Frankenberger, Wichmann-Verlag, Heidelberg. – Portraitfoto © by Andreas Heddergott / TU München

Wissenschaftliche Ziele

Missionsziel von GOCE ist die detailgenaue Vermessung des Gravitationsfelds der Erde. Die Messanordnung soll die Auflösung räumlicher Strukturen von ca. 100 km auf der Erde ermöglichen. Dies mag im Vergleich zur erreichbaren Pixelgröße moderner bildgebender Verfahren eher bescheiden erscheinen. Für ein Schwerefeldmesssystem im Satelliten ist dies jedoch an der Grenze des Möglichen. Die Zielgenauigkeit ist dabei 1 Millionstel der Erdanziehung sowie eine Geoidhöhengenaugigkeit von 1 bis 2 cm. Grundsätzlich erscheint es beinahe paradox, das Gravitationsfeld der Erde vom Weltraum aus erfassen zu wollen, schließlich nimmt nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz die Signalstärke der Massenanziehung mit dem Quadrat des Abstands ab. Andererseits ist es nur mit Satelliten möglich, das Gravitationsfeld der Erde global, gleichmäßig und in vernünftiger Zeit zu vermessen. Um trotz des großen Abstands des Satelliten auf seiner Umlaufbahn von der Erde die gewünschte Genauigkeit zu erzielen, wird bei GOCE erstmals das Prinzip der Gravitationsgradiometrie erprobt. Mit ihm lässt sich bis zu einem gewissen Grad der mit dem Quadrat des Abstands zunehmende Dämpfungseffekt kompensieren.

Welchen Nutzen kann nun die Geodäsie aus dieser Mission ziehen? Lassen Sie hierzu etwas weiter ausholen. Es gehört zu den fundamentalen Aufgaben der Geodäsie, für die Praxis sehr genaue Meereshöhen zur Verfügung zu stellen. Dabei gibt es seit jeher komplizierte Erörterungen über die Wahl des geeigneten Höhentyps: orthometrische Höhe, Normalhöhe oder schlicht sphäroidische Höhe; über die günstigste Transformation zwischen diesen Typen und über die für die Praxis geeigneten Gebrauchsformeln. Hinzu kommt heute die Frage der optimalen Verknüpfung dieser Systeme mit den ellipsoidischen Höhen aus GPS. Aus Sicht der Anwendung wäre es klarer, sich statt auf unterschiedliche Höhenbegriffe nur auf den Begriff der Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten zu beschränken, d.h. auf die Differenz der potentiellen Energie pro Masse im Schwerfeld der Erde. Dies mag sich erst einmal kompliziert anhören, ist jedoch operationeller. Nehmen wir als Beispiel das Walchenseekraftwerk. Hier wird aus der Potentialdifferenz zwischen den Wasserspiegeln des Walchen- und des Kochelsees elektrische Energie erzeugt. Aus der Höhendifferenz und der herabstürzenden Wassermenge lässt sich sehr genau abschätzen, wie viel Energie pro Zeiteinheit erzeugt wird. Lägen die Wasserspiegel der beiden Seen auf ein und derselben Niveauläche, gäbe es keine Potentialdifferenz und keine Energieerzeugung. Gleiche Höhe heißt demnach im operationellen Sinn, Potentialdifferenz gleich Null zwischen den betrachteten Punkten.

Mit den Ergebnissen von GOCE lassen sich die Potentialdifferenzen von Punkten sehr genau und über beliebige Distanzen feststellen. GOCE liefert gleichsam eine einzige erdumspannende Wasserwaage. Damit können wir die Höhensysteme europaweit und weltweit vereinheitlichen und zudem ellipsoidische Höhen aus GPS cm-genau in Meereshöhen oder eben Potentialdifferenzen transformieren. Die Zentimetergenauigkeit erfordert eine Verfeinerung durch Hinzunahme regionaler Schwerfeldinformation aus terrestrischer Gravimetrie, wie sie zum Beispiel in Europa, Nordamerika, Japan und Australien mit hoher Genauigkeit verfügbar ist. Aber auch in geodätisch weniger entwickelten Gebieten werden mit GOCE durch jeden GPS-Empfänger Potentialwerte angezeigt werden, die einer Höhengenaugigkeit im Dezimeterbereich entsprechen. Viele Ingenieuraufgaben werden davon profitieren; es werden zudem nun auch in der Höhe konsistente Geoinformationssysteme entstehen. Auch alle Meerespe-

gel, wie sie global verteilt für die Überwachung des Meeresspiegels verwendet werden, lassen sich miteinander abgleichen. Die Messreihen in Australien, Asien, Antarktis und Amerika werden vergleichbar mit denen in Europa. Es entsteht ein wichtiger Beitrag zum Verständnis des globalen Meeresspiegelanstiegs, der keineswegs global gleichmäßig (eustatisch) ist, sondern regional unterschiedlich von Strömungssystemen, Abschmelzvorgängen und Veränderungen von Temperatur und Salzgehalt gelenkt wird. Der Grundgedanke der Realisierung einer globalen Wasserwaage liegt auch der Anwendung von GOCE in der Ozeanographie zugrunde. Nur die Oberfläche der ruhenden Ozeane wäre eine Äquipotentialfläche, das wohlbekannte Geoid. Tatsächlich strömen die Weltmeere und ihre Zirkulation ist bis zu 50 % verantwortlich für den sehr wichtigen Wärmeaustausch zwischen der Äquatorregion und den Polargebieten. Der Antrieb der Ozeane erfolgt einerseits über die Winde, andererseits über Druckunterschiede, die sich aus der ungleichen Verteilung von Temperatur und Salzgehalt ergeben. Man nennt diesen letzteren Typ einer Zirkulation daher thermohalin. Einmal in Bewegung sorgen die Corioliskräfte für die bekannten Zirkulationsmuster der Ozeane d.h. die Bewegung im Uhrzeigersinn auf dem Nordhalbrund und im Gegenuhrzeigersinn südlich des Äquators. Die thermohaline Strömung bildet sich ab in einer Ozeantopographie, d.h. in einer Auslenkung der Meeresoberfläche vom Geoid. Es entstehen großskalige Ozeanerhebungen und -senken, allerdings erreichen diese Auslenkungen gegenüber dem Geoid nur maximal 1 bis 2 Meter. Die Meeresoberfläche lässt sich mit Satellitenradaraltimetrie zentimetergenau erfassen. Die Zeitreihen erstrecken sich schon über mehr als zwanzig Jahre. Die Geoidform wird von GOCE geliefert. Die Differenz aus altimetrisch ermittelter Ozeanoberfläche und Geoid ergibt die Ozeantopographie. Die Zirkulation erfolgt entlang der Höhenlinien dieser Topographie. Somit lassen sich erstmals die globalen Zirkulationssysteme und ihre zeitlichen Veränderungen direkt über Messungen vom Weltraum aus erfassen. Insbesondere für die Klärung der Frage der Beziehung zwischen Klimaveränderungen und Zirkulationssystemen sind diese Daten von großer Bedeutung.

Ein drittes Anwendungsfeld der GOCE-Daten ist die Geophysik. Gravitation ist Massenanziehung. Das gemessene Gravitationsfeld spiegelt die Massenverteilung in der Erde wider. Es eröffnet sozusagen einen Blick ins Erdinnere. Leider ist der Umkehrschluss nicht ohne weiteres möglich, man spricht von einem inversen Problem. Es sind unendlich viele Massenverteilungen denkbar, die im Außenraum der Erde das gleiche Gravitationsfeld ergeben. Dennoch, diese unendlich vielen denkbaren Verteilungen sind nicht beliebig, sie sind sich alle sehr ähnlich. Die Hinzunahme zusätzlicher geophysikalischer Messdaten, insbesondere die der seismischen Tomographie schränken die Vielfalt der möglichen Lösungen signifikant ein. Das Gravitationsfeldmodell von GOCE liefert somit einen sehr wichtigen Beitrag zum Verständnis der Dynamik des Erdkörpers, d.h. zum Verständnis von Gebirgsbildung, Plattentektonik, Massengleichgewicht und Mantelkonvektion.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die wissenschaftlichen Anwendungsfelder von GOCE in der Ozeanographie, Geophysik und Geodäsie angesiedelt sind. In der Geodäsie werden sich die Höhensysteme global vereinheitlichen lassen und die künftigen Globalen Satellitennavigationssysteme werden nicht nur sehr genaue Ortskoordinaten in Lage und (ellipsoidischer) Höhe liefern sondern auch zentimetergenaue Meereshöhen (oder Potentialunterschiede).

Messprinzip

Zur Bestimmung des Gravitationsfelds der Erde nutzt GOCE zwei sich ergänzende Messsysteme. Mit einem geodätischen GPS-Empfänger europäischer Bauart wird die Bahntrajektorie zentimetergenau vermessen. Der dabei verwendete rein geometrische Ansatz stützt sich auf eine Kombination der Messreihen des GPS-Codes und der Phase der Trägerwellen. Aus der berechneten Bahntrajektorie wird der großskalige Anteil des Erdschwerefelds abgeleitet. Die feinen Details des Gravitationsfelds werden aus den Messungen des Gravitationsgradiometers ermittelt, siehe *Bild 2*. Es wird mit einem System von drei orthogonal angeordneten Paaren von Beschleunigungsmessern erfasst. Diese Sensoren messen an sechs Stellen im Satelliten die Restgravitationsbeschleunigungen im Raumschiff. Diese betragen nur ungefähr ein Millionstel der Anziehung auf der Erde und unterscheiden sich an den sechs, symmetrisch zum Satellitenzentrum angeordneten Stellen in Größe und Richtung. Die Beschleunigungsmessungen erfolgen wiederum auf sechs Stellen genau, d.h. »auf ein Millionstel eines Millionstels der Erdanziehung«.

Diese Präzision ist nur in einem perfekten Weltraumlabor realisierbar (*Bild 1*). Das Gradiometer wird auf ein zehntausendstel Grad temperaturstabil gehalten. Es wurden für den Bau sehr stabile Kohlefaserstrukturen verwendet. Der Satellit wird mit Drehmomentgebern an den Linien des Erdmagnetfelds orientiert und sanft um die Erde geleitet, immer mit der gleichen Achse der Erde zugewandt. Mit einem Ionentriebwerk wird der Satellit auf seiner Bahn in einer Höhe von nur 260 km über der Erde gehalten; diese niedrige Höhe garantiert ein starkes Gravitationssignal der Erde und wird mit GOCE erstmals erprobt. Die Orientierung des dreiachsigen

Gradiometers wird mit Hilfe von Sternsensoren bezüglich des Fixsternhimmels gemessen. Die auf die Beschleunigungsmesser wirkenden Drehraten werden ebenfalls mit den Messungen der Sternsensoren bestimmt und rechnerisch eliminiert.

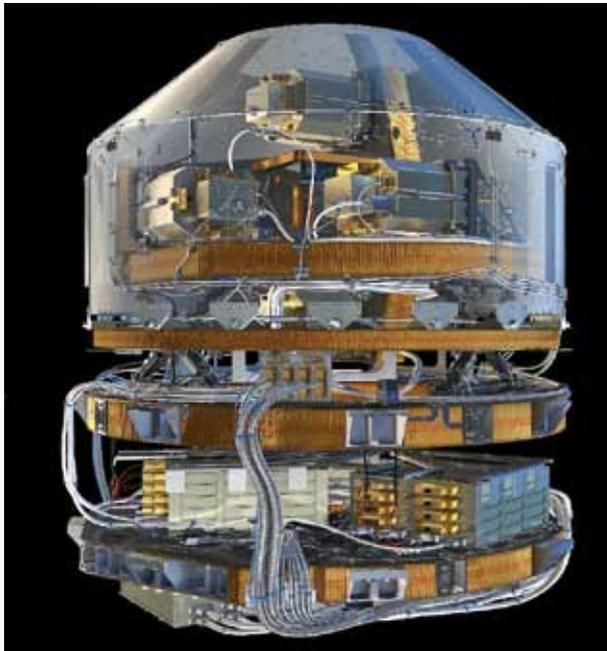


Bild 2: GOCE Gravitationsgradiometer – Im oberen Teil sind drei der insgesamt sechs Beschleunigungsmessgeräte zu erkennen, sie sind jeweils am Ende von drei zueinander orthogonalen Achsen angeordnet (Quelle: ESA)

Nur über das perfekte Ineinandergreifen aller Messsysteme an Bord von GOCE lassen sich die extremen Genauigkeiten des Gravitationsgradiometers tatsächlich nutzen. Mehr als 40 europäische Firmen waren am Bau des Satellitengesamtsystems beteiligt. Alle Sensoren haben den Satellitenstart wohlbehalten überstanden und arbeiten fehlerfrei; ihr Bau stellt das Ergebnis einer anspruchsvollen und technisch einwandfreien Ingenieurleistung dar.

Erste Erfahrungen

In den ersten Monaten nach dem Start wurden alle Instrumente Schritt für Schritt eingeschaltet und überprüft. Es folgte dann eine umfassende Eichung der sechs Beschleunigungsmesser. Seit September 2009 ist GOCE im echten Messbetrieb. Die ersten Monate dienten der Überprüfung der Messdaten und der Feinabstimmung der Prozessierungsalgorithmen. Seit Ende Dezember 2009 kann man von einem echten Auswertemodus sprechen. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend. Die aus GPS errechneten Bahnen sind zentimetergenau, das aus zwei Monaten errechnete Modell des langwelligen Anteils des Gravitationsfelds entspricht wegen der niedrigen Bahn von GOCE in seiner Genauigkeit einem Modell aus zehn Jahren Messdaten des Satelliten CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload). Die gemessenen Gravitationsgradienten weisen eine sehr gute innere Konsistenz auf. Ein erstes Bild des globalen Schwerefelds zeigt bereits die erhofften räumlichen Details. *Bild 3* zeigt eine erste Geoidkarte aus zwei Monaten GOCE-Messdaten. Seit Juli 2010 werden die GOCE-Daten einer großen Zahl von Nutzern in Ozeanographie, Geophysik und Geodäsie zugänglich gemacht.

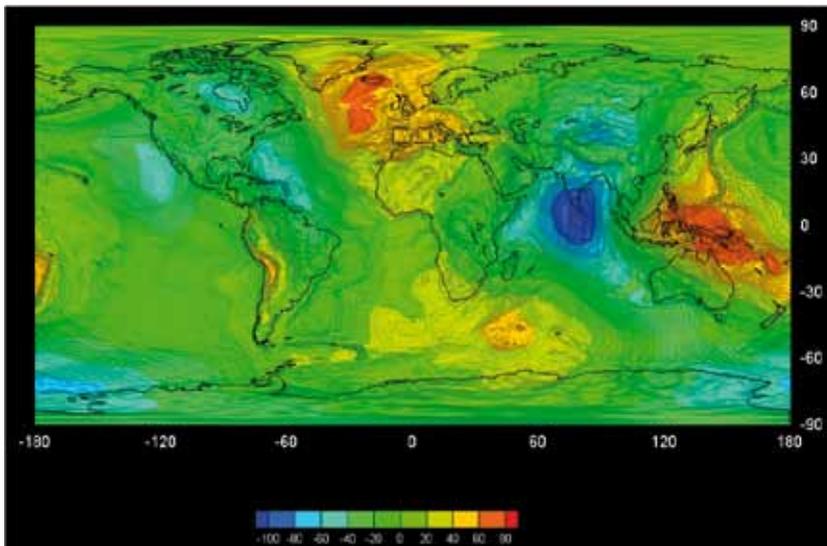


Bild 3: Globale Geoidkarte abgeleitet aus zwei Monaten Missionsdaten von GOCE – Zu erkennen sind die bekannten Geoidstrukturen mit einem Minimum südlich von Indien. Durch die gewählte Beleuchtung werden auch typische geophysikalische Muster erkennbar, wie zum Beispiel die Subduktionszone entlang der Westküste Südamerikas, der Ozeanrücken südlich von Island und das postglaziale Massendefizit in Nordkanada. Geoidhöhen in Meter.

