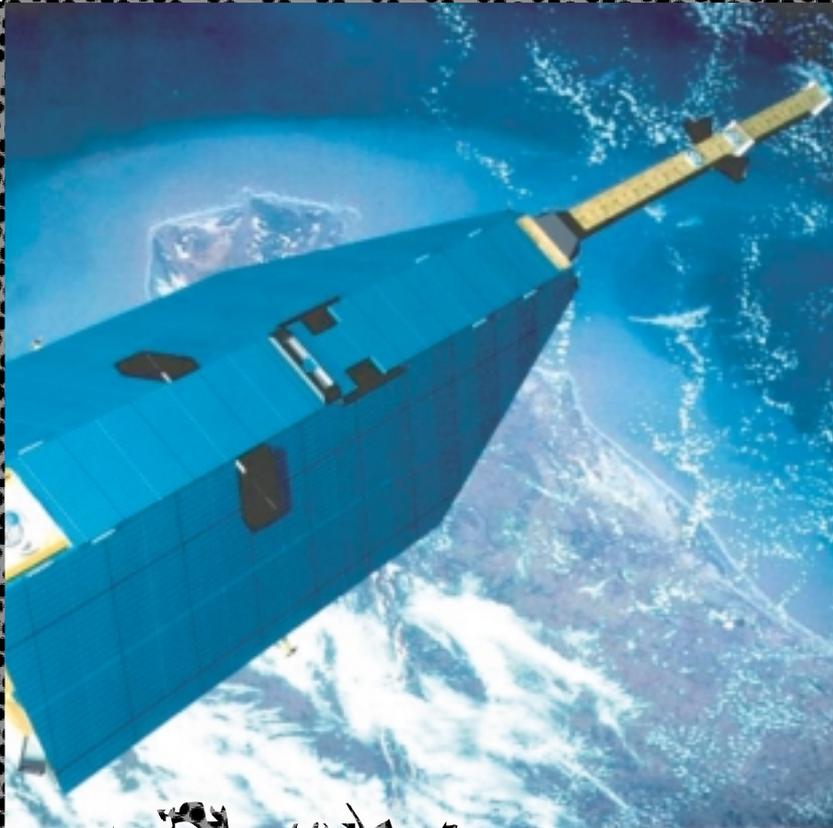


Satelliten im Dienst der Geodäsie und Geoinformatik





Am 4. Oktober 1957 wurde vom Gebiet der damaligen UdSSR der erste künstliche Satellit der Erde in den Weltraum geschickt. Von den vielen Nachfolgemissionen der vergangenen 46 Jahre waren einige Satelliten speziell für Aufgaben der Geodäsie und Geoinformatik designed; viele weitere, ursprünglich für andere Aufgaben in Betrieb genommene Satelliten erwiesen sich im Nachhinein als sehr gute Lieferanten von Daten zur Lösung geodätischer Probleme. Um diesen Beitrag der Satellitenmethoden im richtigen Licht zu sehen, ist es aufschlussreich, zuerst die Entwicklung der Geodäsie von ihren Ursprüngen bis zum Jahre 1957 nachzuvollziehen. Dies kann natürlich im Rahmen dieses Beitrags nur in Form von mehr oder weniger subjektiv herausgegriffenen Einzelereignissen der Geschichte erfolgen.

Ausmessen und eine Dokumentation der Messergebnisse, zum Beispiel in einer graphischen Darstellung. Im lokalen Bereich dienen diese Verfahren zur Festlegung von Eigentums- und Nutzungsrechten; im regionalen/kontinentalen Bereich wurden auf diese Weise die Informationen (heute würde man den Begriff Geoinformation verwenden) bereitgestellt, die dem Kartographen das Zeichnen von topographischen Karten ermöglichten (Abb. 1).



Abb. 1: Feldvermessung im Ägypten des Altertums. Dargestellt ist die Arbeit eines Messtrupps, der die Größe und Lage eines Getreidefeldes erfasst. Die Messung erfolgt mit einem gespannten Strick, der durch Knoten in Längeneinheiten unterteilt ist. Bildquelle: Bialas, 1982.

Geodäsie und Geoinformatik vor dem Zeitalter der Satelliten

Das Wort Geodäsie hat seinen Ursprung im Griechenland des Altertums; es wurde wohl erstmalig von Aristoteles (384-322 v. Chr.) erwähnt. Im Altgriechischen setzte es sich aus den Stammwörtern $\gamma\eta$ (Erde) und $\delta\alpha\omega$ (ich teile) zusammen (Torge, 2003); Geodäsie hat also ursprünglich mit dem Teilen der Erde zu tun, oder eher mit dem Aufteilen der Erdoberfläche. Dieses Aufteilen der Erdoberfläche in Teilbereiche bedingt natürlich auch ein

Alfred Kleusberg ■
Satelliten im Dienst der Geodäsie und Geoinformatik ■

Die oben angegebenen Dreiecksnetze und das Geoid dienen nicht nur der Bestimmung der Figur des Erdkörpers, sondern sie sind auch Grundlage für die Erfassung und Darstellung von Geoinformation im Bereich der Ausdehnung der jeweiligen Netze. Diese Geoinformation besteht anfangs primär aus Topographie, Landbedeckung, Landnutzung, und Landeigentumsrechten. Sie wird ursprünglich durch weitere Messungen direkt im Feld erfasst. Mit dem Aufkommen der zivilen Luftfahrt nach dem Ende des 1. Weltkrieges gewinnt jedoch die neue Disziplin der Luftbildphotogrammetrie zunehmend an Bedeutung.

Luftbilder (Abb. 4) erfassen flächenhaft die Geoinformation in einem Gebiet; die zeitaufwendigen Messungen im Feld werden nun durch Informationsextraktion aus Luftbildern ersetzt. Die Geoinformation wird teilweise in Buch- und Bildform archiviert und auch anhand von Karten in verschiedenen Maßstäben dargestellt und den Endnutzern zugänglich gemacht. Als Beispiel ist in Abbildung 5 ein Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1:50000 mit dem Campus Vaihingen der Universität Stuttgart dargestellt. Für solche Karten gilt allgemein, dass die horizontale Lage von Objekten bezüglich eines Ellipsoids dargestellt ist; die vertikale Lage von Objekten (die Höhe) ist immer bezüglich des Geoids dargestellt.

Nach diesem kurzen Abriss der Geschichte von Geodäsie und Geoinformatik können wir nun den Sachstand zu Beginn des Zeitalters künstlicher Erdsatelliten in einer Art von Mängelliste zusammenfassen.

1. Triangulationsnetze bilden die Grundlage zur Erfassung und Darstellung von Geoinformation. Solche Netze werden mit Theodoliten vermessen und bedingen dadurch die gegenseitige Sichtbarkeit der Netzpunkte. Dies limitiert die Ausdehnung der Netze auf den kontinentalen Bereich und küstennahe Inseln. Aus politischen Gründen sind Triangulationsnetze sogar oft auf den Bereich einzelner Staaten begrenzt.
2. Bei der Auswertung der Messungen in den vielen verschiedenen Triangulationsnetzen werden lokal/regional am besten passende Ellipsoide unterschiedlicher Größe verwendet. Im Bereich der alten Bundesländer Deutschlands ist dies das Bessel-Ellipsoid.

Abb. 4: Panchromatisches Luftbild. Wenn vom Flugzeug aus photographische Aufnahmen des überflogenen Gebiets vorliegen, kann der Prozess der Bestimmung von Koordinaten einzelner Objekte sowie die Interpretation der Landbedeckung und Landnutzung größtenteils im Büro erfolgen. Luftbildphotogrammetrie erlaubt im Vergleich zu Feldverfahren eine bedeutend schnellere Datenakquisition. Bildquelle: Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart.



Abb. 5: Topographische Karte 1:50000 (TK50). Eines der Endprodukte klassischer Geodäsie und Geoinformatik sind die Papierkarten, die auf verschiedenen Maßstäben topographische Information bereitstellen. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus der TK50 im Bereich Vaihingen. Unten links ist das Autobahnkreuz Stuttgart zu sehen. Rechts oberhalb davon erkennt man den Campus Vaihingen der Universität. Bildquelle: Institut für Navigation der Universität Stuttgart; Landesbetrieb Vermessung – BW.

3. Messungen zur Bestimmung des Geoid erfolgen nur auf festem Land sowie in küstennahen Bereichen (Seegravimetrie). Demzufolge liegen auch für das Geoid nur „Inselösungen“ vor.
4. In den Ländern Europas ist Geoinformation in Form von zum Beispiel Topographischen Karten über Jahrhunderte hinweg akkumuliert worden; Geoinformation liegt hier detailliert und nahezu flächendeckend vor. In einer Vielzahl anderer Länder existieren Grundlagennetze sowie Geoinformation nur in äußerst lückenhafter Art und Weise.

Zuletzt noch ein Wort zur Genauigkeit der terrestrisch bestimmten Grundlagennetze. Aufgrund von unvermeidlichen Mess- und Modellfehlern in der Triangulation liegt in diesen Netzen eine relative Genauigkeit von ca. 10^{-5} vor, das heißt, die aus den Koordinaten zweier Netzpunkte im Abstand von 100 Kilometern gerechnete Strecke kann um einen Meter von der tatsächlichen Strecke in der Natur abweichen.

An der PAGEOS-Beobachtungskampagne waren 45 global verteilte Stationen beteiligt; die Abstände zwischen benachbarten Stationen waren in der Größenordnung von 3 000 bis 4 000 Kilometern.

Alle Messungen wurden gemeinsam ausgewertet und ergaben zum ersten Mal Koordinaten für die beteiligten Stationen in einem einheitlichen globalen Koordinatensystem; die geodätische Verknüpfung der Kontinente war gelungen (vergl. Nr. 1 der obigen „Mängelliste“)! Zusätzlich zeigte die Auswertung auch, dass gegenüber der konventionellen terrestrischen Triangulation die relative Genauigkeit des Stationsnetzes um mehr als eine Größenordnung auf besser als 10^{-6} verbessert worden war.

Im Laufe der 60-er Jahre gab es noch eine Reihe anderer optisch beobachtbarer Satelliten. Einige dieser Satelliten waren aktiv und sendeten sehr kurze Lichtblitze aus; das Messverfahren für alle diese Satelliten basierte auf der oben beschriebenen photographischen Aufnahme.

Satelliten zur Bestimmung geodätischer Grundlagennetze

Es wurde nach dem Start der ersten Satelliten unmittelbar erkannt, dass simultane Richtungs- oder Distanzmessungen von mehreren Stationen auf der Erde zu Satelliten die Bestimmung der Distanzen und Richtungen zwischen den Beobachtungsstationen erlauben. Deshalb bedarf es nicht mehr der gegenseitigen Sichtbarkeit zwischen den Stationen wie bei Triangulationsnetzen. Des Weiteren wurde erkannt, dass Satelliten mit ausreichend großer Bahnhöhe simultan von verschiedenen Kontinenten aus beobachtet werden können; damit lag das Konzept zur Beobachtung eines den Erdkörper komplett umspannenden Grundlagennetzes vor.

Passive Geodetic Satellite (PAGEOS)

Die Realisierung dieses Konzepts erfolgte in den Jahren 1966 bis 1972 unter amerikanischer Federführung durch optische Beobachtungen des PAGEOS (Passive GEOdetic Satellite). PAGEOS war ein Ballon-Satellit von ca. 30 Metern Durchmesser in einer genähert polaren Umlaufbahn; im Laufe seiner Lebensdauer variierte die Bahnhöhe zwischen 5 600 und 2 800 Kilometer. Aufgrund der großen Bahnhöhe wurde der Satellit noch von der Sonne beleuchtet, wenn auf der Erde schon die Nacht angebrochen war. Dann konnte der Satellit mit speziell entwickelten Kameras langer Brennweite vor dem Hintergrund des Sternhimmels photographiert werden. Durch Ausmessung der Abstände des Satellitenbildes zu ebenfalls in den photographischen Platten abgebildeten Sternen mit bekannten Richtungen wurde die Richtung von der Beobachtungsstation zu PAGEOS ermittelt (Abb. 6).

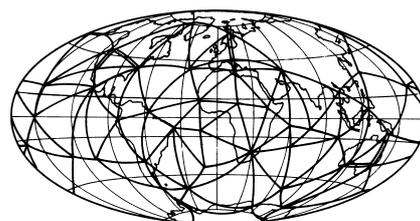


Abb. 6: Weltnetz der Satellitentriangulation. Aus photogrammetrischen Aufnahmen des PAGEOS von 45 global verteilten Beobachtungsstationen aus in den Jahren 1966 - 1972 wurde das erste erdumspannende geodätische Grundlagennetz berechnet. Da die photogrammetrischen Aufnahmen primär Winkelmessungen entsprechen, sprach man nach terrestrischem Vorbild von Satellitentriangulation. Bildquelle: Nach Seeber, 2003.

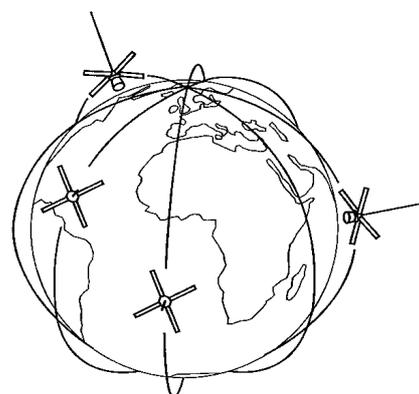


Abb. 7: Das Navy Navigation Satellite System. Sechs Navigationssatelliten umlaufen in polaren Bahnen die Erde. Die Bahnhöhe beträgt ca. 1 000 Kilometer über der Erdoberfläche. Ein Bahnlauf dauert ca. 105 Minuten; die Signale eines Satelliten sind während eines Überflugs bis zu 20 Minuten empfangbar. Bildquelle: Nach Seeber, 2003.

Navy Navigation Satellite System (NNSS)

Der 1957 gestartete erste Satellit Sputnik 1 sendete Radiosignale im VHF-Frequenzbereich aus. Diese Signale wurden von vielen Forschergruppen weltweit empfangen und analysiert. Wie zu erwarten, zeigten die empfangenen Signale aufgrund der Relativgeschwindigkeit zwischen Signalsender (im Sputnik 1) und Signalempfänger (erdfest) eine Frequenzverschiebung; dies ist die nach C. Doppler benannte Dopplerverschiebung. Da die Relativgeschwindigkeit des Satelliten direkt mit der Geometrie der Satellitenbahn verknüpft ist, lässt sich bei bekannter Position des Signalempfängers aus gemessenen Dopplerverschiebungen eines Satellitensignals die Bahn des Satelliten berechnen.

Man erkannte in den USA, dass die Umkehrung dieses Zusammenhangs ebenfalls möglich sein musste: ist die Satellitenbahn bekannt, kann man aus gemessenen Dopplerverschiebungen die Position des Signalempfängers berechnen. Dieses Konzept liegt dem NNSS zugrunde, das, wie der Name besagt, für Zwecke der Navigation der amerikanischen militärischen Marine im Jahre 1964 operationell wurde und wenige Jahre später auch für zivile Anwendung freigegeben wurde (Abb. 7).

Zum NNSS gehörten nominal sechs Satelliten in polaren Bahnen in einer Höhe von 1 000 Kilometern. Es war das erste Satellitennavigationssystem und war als solches global verfügbar. Durchschnittlich 15-mal pro Tag konnten Dopplermessungen von ca. 20 Minuten Dauer während der „Sichtbarkeit“ eines Satelliten durchgeführt werden. Für die Zwecke der Schiffsnavigation wurden Dopplermessungen eines kompletten Satellitendurchgangs verwendet; die resultierende Positionsgenauigkeit von etwa 100 Metern auf dem offenen Ozean war zur damaligen Zeit mit keinem anderen Navigationsverfahren erreichbar.

Für geodätische Zwecke war diese Genauigkeit natürlich indiskutabel. Um das Satellitennavigationssystem dennoch für die Erstellung von Grundlagennetzen zu nutzen, ergriffen Geodäten zwei Maßnahmen: zum einen wurden die Messungen wie bei PAGEOS simultan auf allen Stationen eines zu bestimmenden Grundlagennetzes durchgeführt und zum anderen wurden die Messungen über mehrere

Tage akkumuliert und gemeinsam ausgewertet. Da die Bahnen der Satelliten verglichen mit PAGEOS relativ niedrig waren, war auch die Distanz zwischen benachbarten Beobachtungsstationen entsprechend begrenzt. Deshalb wurden NNSS-Messungen hauptsächlich zur schnellen Bestimmung nationaler und regionaler geodätischer Netze angewandt. Mit dem NNSS war auch in den wenig entwickelten Ländern innerhalb weniger Wochen mit sehr geringem finanziellen und personellen Aufwand somit eine geodätische Infrastruktur mit einer relativen Genauigkeit von etwa 10^{-6} erreichbar, für die die Länder Europas Hunderte von Jahren konventioneller terrestrischer Triangulation aufgewandt hatten (vergl. Nr. 4 der obigen „Mängelliste“)

Global Positioning System (GPS)

Für die Navigation hatte das NNSS den entscheidenden Nachteil, dass es aufgrund des zeitaufwendigen Messverfahrens nur für langsam bewegte Fahrzeuge (Schiffe) geeignet war. Deshalb begann die amerikanische Luftwaffe bereits in den 70er Jahren die Entwicklung eines moderneren Satellitensystems, das auch die Navigation von Flugzeugen mit hoher Dynamik erlauben sollte. Diese Entwicklungen mündeten schließlich im Global Positioning System (GPS), das im Jahr 1995 operationell wurde. Im Unterschied zum NNSS besteht das GPS aus mindestens 24 Satelliten. Da diese sich auf einer sehr großen Bahnhöhe von ca. 20 000 Kilometern befinden, sind die Mikrowellensignale von mindestens vier Satelliten zu jeder Zeit an jedem Ort der Erde empfangbar. Aus simultanen Messungen von vier Satellitensignalen ist die Position unmittelbar bestimmbar; eine Datenakkumulation über mehrere Minuten wie beim NNSS ist nicht mehr erforderlich. Da die Signale des GPS auch für zivile Nutzung freigegeben sind, hat sich das GPS in der letzten Dekade als Standardverfahren für Positionsbestimmung und Navigation in vielen Bereichen etabliert; die instantane Positionsgenauigkeit ist um ungefähr den Faktor 10 besser als beim NNSS (Abb. 8).

Sehr früh in der Entwicklung des GPS erkannte man auch, dass mit verfeinerten Mess- und Auswerteverfahren die dreidimensionale Koordinatendifferenz zwischen zwei Punkten mit cm-Genauigkeit bestimmbar war. Für diese Anwendung des GPS werden seit Mitte der 80er Jah-

re besonders hochwertige geodätische GPS-Empfänger hergestellt. Diese Empfänger zeichnen im Allgemeinen vor Ort die Messwerte auf, die dann anschließend am Computer ausgewertet werden. Hierbei hängt der erforderliche Zeitaufwand für die Datenaufzeichnung von den Distanzen zwischen den Empfängern ab.

Distanzen bis zu zehn Kilometer: Einige Minuten Messzeit erlauben die Punktbestimmung mit cm-Genauigkeit. Typische Anwendungen sind im Bereich des klassischen Vermessungswesens: Grundstücksvermessungen, Vermessungen im Zusammenhang mit der Planung und Erstellung von Bauwerken. Verglichen mit herkömmlichen Vermessungsmethoden bietet GPS eine erhebliche Zeitersparnis. Deshalb gehören GPS-Empfänger heute zur Standardausrüstung eines jeden Vermessungsbüros.

Für Distanzen bis zu 500 Kilometer wird cm-Genauigkeit mit einer Messdauer von einigen Stunden erreicht. Typische Anwendungen in dieser Kategorie sind die Erstellung von nationalen und kontinentalen geodätischen Grundlagennetzen. Obwohl derartige Grundlagennetze in vielen Ländern der Welt bereits mit dem NNSS (s.o.) eingerichtet wurden, sind in den letzten Jahren praktisch alle diese Netze mit dem GPS neu erfasst worden; mit relativ geringem zeitlichen Aufwand konnte so die Netzgenauigkeit um mehr als eine Größenordnung auf besser als 10^{-7} gesteigert werden. Neue Grundlagennetze in den auch heute noch wenig entwickelten Ländern werden grundsätzlich mit diesem Verfahren erstellt.

Die große Bahnhöhe der GPS-Satelliten (im Gegensatz zum NNSS) erlaubt auch die Beobachtung interkontinentaler und globaler Netze. Mit einem Messaufwand von einigen Tagen wird so auch cm-Genauigkeit über Distanzen von 10 000 Kilometern möglich (relative Genauigkeit von 10^{-9}). An dieser Stelle mag sich nun der Leser fragen, wer außer einem Geodäten daran interessiert sein könnte, ob die Distanz zwischen zwei Punkten in Stuttgart und New York einen Zentimeter kürzer oder länger sei; doch mehr dazu im nächsten Abschnitt.

Die präzise Verknüpfung der Grundlagennetze aller Länder und aller Kontinente hat es ermöglicht, dass ein global dem Erdkörper best angepasstes Ellipsoid realisiert wurde. Dieses Ellipsoid wurde weltweit als Standard für die kartenmäßige Darstellung von Geoinformation adop-

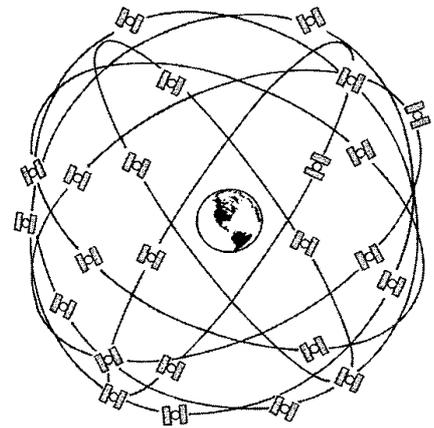


Abb. 8: Das Global Positioning System. 24 Navigationsatelliten umlaufen in drei verschiedenen Bahnebenen die Erde. Die Bahnebenen sind um 55 Grad gegen den Äquator geneigt. Die Bahnhöhe beträgt ca. 20 000 Kilometer über der Erdoberfläche. Ein Bahnlauf dauert ca. 12 Stunden; die Signale eines Satelliten sind während eines Überflugs bis zu sechs Stunden empfangbar. Man beachte im Vergleich zum NNSS die größere Erdferne der Satelliten. Bildquelle: Nach Seeber, 2003.

tiert (s. Nr. 2 der obigen „Mängelliste“). So werden auch in Deutschland seit einigen Jahren die topographischen Karten (sowohl in digitaler Form als auch in Papierform) vom Bessel-Ellipsoid auf das Ellipsoid des WGS84 (World Geodetic System 1984) umgerechnet.

GPS zur Beobachtung der Deformation des Erdkörpers

Vor mehr als 200 Millionen Jahren formte sich der bisher letzte Superkontinent, Pangäa; vor ca. 160 Millionen Jahren begann Pangäa auseinander zu brechen. Der Bewegungsablauf der Landmassen über die letzten 200 Millionen Jahre ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt. Vor 200 Millionen Jahren (oben) existierte noch der Superkontinent; im untersten Teil der Abbildung erkennt man die bekannte heutige Verteilung der Kontinente.

Die Ursachen dieser Bewegungsvorgänge liegen im Erdinneren und sind Gegenstand der Untersuchungen von Geophysik und Geologie. Die Vorgänge sind nicht abgeschlossen und werden irgendwann in ferner Zukunft zur Bildung des nächsten Superkontinents führen.

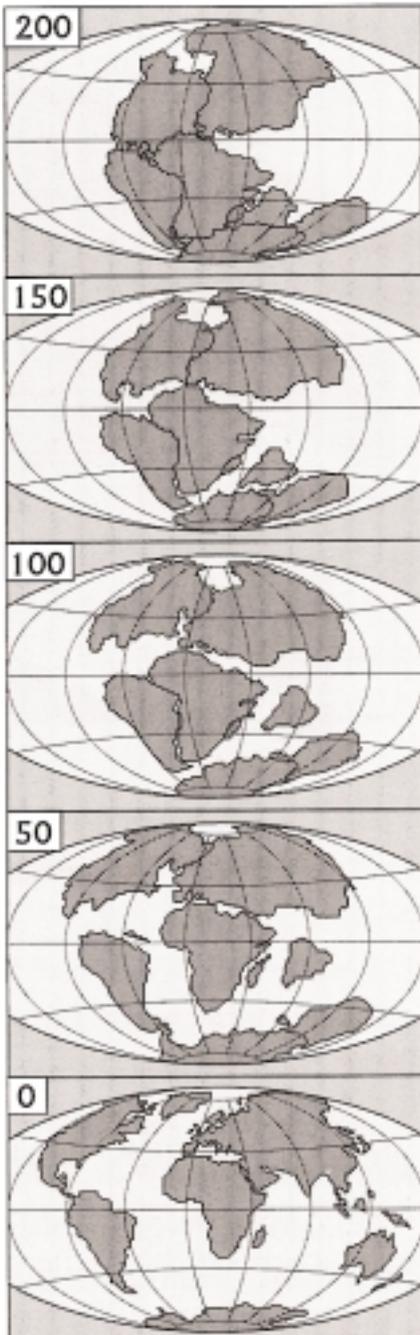


Abb. 9: Von Pangäa bis heute. Fünf Bilder im Abstand von 50 Millionen Jahren zeigen den Zerfall des letzten Superkontinents, Pangäa, zur heutigen Verteilung der Landmassen auf der Erde. Vor 100 Millionen Jahren (Mitte) haben sich die heutigen Kontinente Antarktis und Australien bereits abgelöst; Afrika, Eurasien und die Amerikas sind noch verbunden. Bildquelle: Nach Smil, 2003.

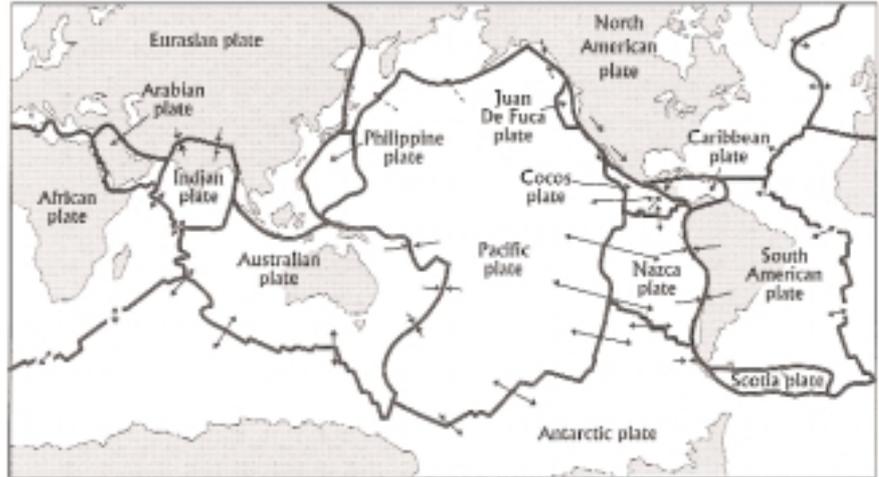


Abb. 10: Plattentektonik. Die Bewegung der Platten der Erdkruste gegeneinander beziehungsweise auseinander ist durch Pfeile dargestellt. Die größten Pfeile (Nasca Platte – pazifische Platte) entsprechen einer Geschwindigkeit von 0,1 Meter pro Jahr. Bildquelle: Nach Smil, 2003.

Während Alfred Wegener zu Beginn des letzten Jahrhunderts für die Kinematik der Landmassen den Begriff Kontinentaldrift prägte, spricht man heute von Plattentektonik. Die Erdkruste besteht aus einer Reihe von Platten, die sich relativ zueinander bewegen, Abbildung 10. Wo die Plattenränder sich voneinander weg bewegen, steigt von unten aus dem Erdmantel Magma auf und formt neuen (ozeanischen) Boden. Wo sich die Plattenränder aufeinander zu bewegen (zum Beispiel im Westen Südamerikas) oder aneinander scheren (beispielsweise im Westen Nordamerikas), kann es zu seismischen Aktivitäten in Form von Erdbeben kommen. Daher gibt es ein offensichtliches Interesse, die Kinematik der Platten bestmöglich zu erfassen und ihre Konsequenzen abzuschätzen.

Die Relativgeschwindigkeit der Platten zueinander beträgt bis zu ca. 0,1 Meter pro Jahr. Globale Netze, die mit GPS-Empfängern bestückt sind, erlauben durch regelmäßige Wiederholungsmessungen die direkte Erfassung dieser Kinematik der Platten der Erdkruste. Unter anderem zu diesem Zweck besteht seit 1999 der International GPS Service (IGS, früher International GPS Service for Geodynamics). Der IGS wurde von der International Association of Geodesy (IAG) gegründet und besteht heute aus über 300 permanent aktiven GPS Empfängern, deren Messdaten automatisch direkt zu regionalen und globalen Datenanalysezentren übertragen werden. Diese Datenzentren berechnen in regelmäßigen Abständen Koordinaten und Geschwindigkeiten der am Netz beteiligten

GPS Empfänger. Hieraus wiederum werden Bewegungsraten für die Platten der Erdkruste berechnet, die der Verifikation und Verbesserung der geophysikalischen Modelle für die Plattentektonik dienen.

Satelliten zur Bestimmung des Geoid

Wie in der Einführung erwähnt, ist im geodätischen Sinn die Form der Erde diejenige Niveaufläche des Schwerepotentials der Erde, die im Mittel mit der Meeresoberfläche zusammenfällt. In der klassischen Geodäsie wurde diese Fläche, das Geoid, durch Messungen an der Erdoberfläche punktwise konstruiert. Wie bereits ausgeführt, konnten derartige Messungen nur auf dem Land und in küstennahen Bereichen durchgeführt werden. Dies führte zwangsläufig zu Inselösungen für das Geoid; ein globales Geoid, das heißt eine global gültige Form der Erde, war nicht bestimmbar. Hier hat das Zeitalter der künstlichen Erdsatelliten ganz neue Möglichkeiten eröffnet.

Satellitenaltimetrie

Seit Mitte der 70er Jahre sind über zehn Satelliten gestartet worden, die neben anderen Sensoren auch mit Altimetern ausgerüstet sind. Diese Altimeter senden aus einer Höhe von 800 bis 1 400 Kilometern Mikrowellensignale senkrecht nach unten. Über den Ozeanen werden diese Signale an der Meeresoberfläche reflektiert und danach wieder im Satelliten empfangen; aus der Signallaufzeit

wird die Höhe des Satelliten über der Meeresoberfläche ermittelt. Wird nun gleichzeitig mit anderen Messmethoden (zum Beispiel GPS) die Position des Satelliten bestimmt, so kann aus den Altimetermessungen die Höhe der Meeresoberfläche über dem Ellipsoid des WGS84 (s.o.) abgeleitet werden (Abb. 11).

Da nach der Gaußschen Definition die Meeresoberfläche mit dem Geoid zusammenfällt, hat man somit direkt einen Punkt des Geoids erfasst. Während eines Überflugs des Satelliten tastet der Altimeter ein Profil des Geoid ab; im Laufe der Lebensdauer des Satelliten werden Tausende von Profilen erfasst, die die Ozeane netzförmig überdecken. Auf diese Weise wird flächendeckend das Geoid im Bereich der Ozeane durch Satellitenaltimetrie erfasst, das eine ideale Ergänzung zu den Geoid-Insellösungen (s. Nr. 3 der obigen „Mängelliste“) darstellt.

Die Messverfahren der Satellitenaltimetrie erlauben die Bestimmung der Höhe der Meeresoberfläche mit einer Genauigkeit von besser als ein Dezimeter. Das überträgt sich jedoch leider nicht in eine gleiche Genauigkeit für das Geoid, denn auch hier steckt, wie so oft, der Teufel im Detail. Wie Gauß zu seiner Zeit noch nicht wissen konnte, ist die Meeresoberfläche nicht exakt eine Niveaulfläche des Schwerepotentials der Erde. Aufgrund von Salinitäts- und Temperaturunterschieden der verschiedenen Meeresbereiche sowie aufgrund großräumiger Meeresströmungen liegt die mittlere Meeresoberfläche teilweise um bis zu zwei Meter unterhalb beziehungsweise oberhalb des Geoid. Hier liegt also eine fundamentale Beschränkung der Geoidbestimmung aus Altimetermessungen vor; will man höhere Genauigkeiten erreichen, müssen andere Methoden gewählt werden.

Satelliten zur Erfassung des Gravitationsfelds der Erde

Wir kommen zurück zur Definition des Geoid als Niveaulfläche des Schwerepotentials der Erde. Kennt man dieses Schwerepotential, so kann man rechnerisch daraus die geeignete Niveaulfläche ableiten.

Das Schwerepotential W der Erde ist die Summe von Zentrifugalpotential U und Gravitationspotential V .

$$W(\mathbf{x}) = U(\mathbf{x}) + V(\mathbf{x})$$



Abb. 11: Prinzip der Satellitenaltimetrie. Ein Radaraltimeter sendet mit einer Richtantenne Mikrowellensignalsimpulse senkrecht nach unten. Treffen diese Signale in den ozeanischen Bereichen auf die Meeresoberfläche, so wird ein Teil der Signalenergie nach oben reflektiert. Im Satelliten wird die Gesamtlaufzeit des Signals gemessen, aus der die Entfernung zwischen Satellit und reflektierender Wasseroberfläche abgeleitet wird. Ein Altimeter misst somit die Höhe des Satelliten über der Meeresoberfläche. Bildquelle: Jet Propulsion Laboratory.

Das Zentrifugalpotential als Funktion von Ort (\mathbf{x}) und der Rotationsgeschwindigkeit der Erde kann für unsere Zwecke als bekannt vorausgesetzt werden. Somit verbleibt nur die Bestimmung des Gravitationspotentials; die direkte Berechnung des Gravitationspotentials ist jedoch nicht möglich, da sie von der nur unzureichend bekannten Dichteverteilung der Massen im Erdinneren abhängt. Einen Zugang zur indirekten Bestimmung des Gravitationspotentials erhält man aber durch die Betrachtung der Bewegungsgleichung eines Satelliten. Bei Vernachlässigung von Störkräften gilt, dass ein Satellit sich im freien Fall um die Erde befindet. Freier Fall heißt hier, dass auf den Satelliten nur die aus dem Gravitationspotential resultierende Gravitationskraft einwirkt. Mathematisch ist dies ausgedrückt durch die Bewegungsgleichung des Satelliten:

$$\mathbf{x}(t) = \text{grad}V(\mathbf{x})$$

Auf der linken Seite der Gleichung steht die zweite zeitliche Ableitung des Ortes des Satelliten, seine Beschleunigung; auf der rechten Seite steht der Gradient des Gravitationspotentials der Erde. Diese Gleichung stellt den grundlegenden Zusammenhang zwischen der Bahn eines Satelliten und dem Gravitationspotential der Erde dar. Der Satellit kann also als Testkörper im Gravitationsfeld der Erde betrachtet werden; die Beobachtung des Testkörpers erlaubt die Bestimmung der Parameter des Feldes. Ein vollständiges Konzept zur Nutzung dieses Zusammenhangs für die Analyse von Satellitenbah-

nen wurde bereits in der Frühzeit der Satelliten vorgestellt (Kaula, 1966).

Satelliten mit Laser-Reflektoren

In den vergangenen 40 Jahren sind mehr als 30 Satelliten gestartet worden, die mit Laser-Reflektoren ausgerüstet waren. Einige dieser Satelliten (Starlette, Lageos, Ajisai, Etalon) bestehen nur aus einem passiven kugelförmigen Trägerkörper mit rundum angebrachten Reflektoren; die Mehrzahl der Satelliten trägt jedoch Laserreflektoren als Teil eines viel umfangreicheren Sensorpakets. Die Bahnhöhen der Satelliten liegen zwischen 400 und 20 000 Kilometern; die Bahnneigungen zum Äquator variieren zwischen 40 Grad und 115 Grad.

Die von den Satelliten getragenen Reflektoren dienen als Ziele für Entfernungsmessungen mit aufwendig konstruierten Lasern, die teilweise fest in Observatorien eingebaut sind und teilweise als Mobilgeräte an verschiedenen Orten der Erde für einen gewissen Zeitraum betrieben werden. Insgesamt gibt es weltweit ca. 40 dieser Instrumente, die nach einem koordinierten Beobachtungsplan Messungen zu den am jeweiligen Ort „sichtbaren“ Satelliten durchführen.

Zu diesem Zweck müssen die Laserteleskope extrem genau auf das Ziel ausgerichtet werden: Reflektoren in der Größe von Dezimetern in einer Entfernung von 20 000 Kilometern mit einem Laserimpuls zu treffen, verlangt eine gewisse Zielsicherheit. Weiterhin muss das Teleskop der Bewegung des Satelliten kontinuierlich nachgeführt werden, um während des gesamten Durchgangs des Satelliten Entfernungsmessungen im zeitlichen Abstand von einer Zehntel Sekunde durchzuführen. Zum Dritten muss der Laser Impulse von sehr hoher Energiedichte erzeugen, damit nach der sehr langen Signallaufzeit ein noch messbarer Anteil des Impulses zurückkommt.

Aufgrund dieser Randbedingungen sind derartige Laserinstrumente sehr komplex und aufwendig sowohl in der Herstellung als auch im Betrieb; dies erklärt die geringe Anzahl von ca. 40 verfügbaren Instrumenten weltweit. 40 Laser können aber nur an 40 verschiedenen Positionen auf der Erde Messungen zu den dort sichtbaren Satelliten durchführen. Das hat als direkte Folge eine nur lückenhafte Beobachtung der Bahn der Satelliten; Messungen können nur zu relativ kurzen Abschnitten der Bahn durchgeführt werden.

Über die vergangenen vier Jahrzehnte hinweg wurden Lasermessungen zu Tausenden und Abertausenden von Bahnbögen akkumuliert, aus denen mit aufwendigen Computerprogrammen Modelle für das Gravitationspotential der Erde und das Geoid abgeleitet wurden. Da im Laufe der Zeit immer mehr Messungen zur Verfügung standen, wurden auch die berechneten Modelle immer genauer; eine grundsätzlich nicht überwindbare Einschränkung ist jedoch das lückenhafte Datenmaterial aufgrund der geringen Anzahl von Laserinstrumenten.



Abb. 12: Der Satellit CHAMP. Der deutsch-amerikanische Satellit CHAMP wurde in Deutschland hergestellt und wird vom Geoforschungszentrum Potsdam betrieben. Ziel der CHAMP Mission ist die Erfassung des Gravitationsfeldes der Erde aus den Bahnvariationen des Satelliten. Bildquelle: Geoforschungszentrum Potsdam.

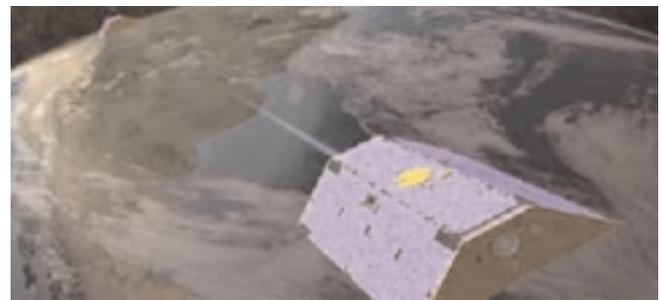


Abb. 13: Die GRACE Mission. GRACE ist ebenfalls eine deutsch-amerikanische Gemeinschaftsmission. Aus den Variationen der Entfernung zwischen zwei dem CHAMP im Aufbau ähnlichen Satelliten soll das Gravitationsfeld der Erde und seine zeitlichen Veränderungen bestimmt werden. Bildquelle: Geoforschungszentrum Potsdam.

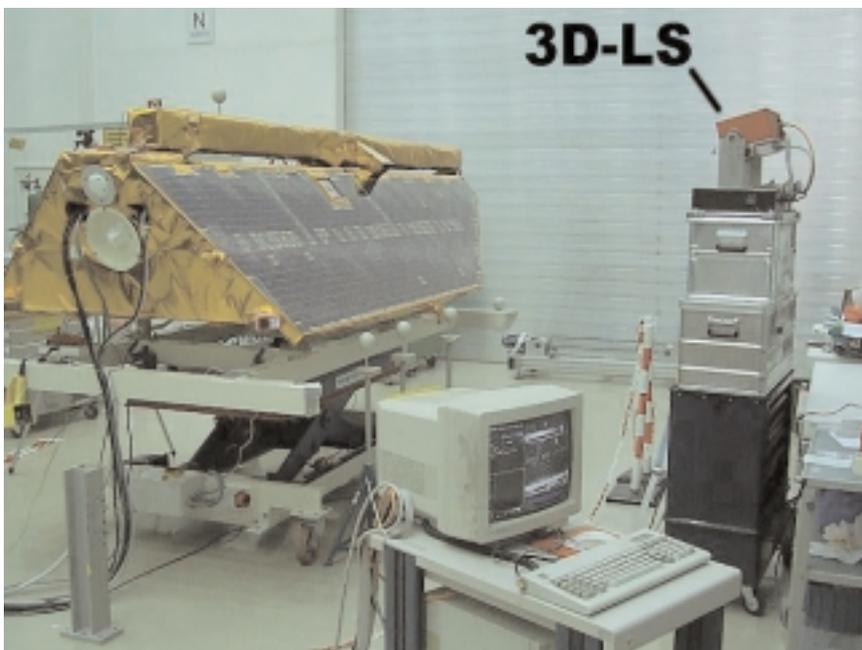


Abb. 12 a: Digitale Erfassung der Form des Champ Satelliten im Labor. Links in der Abbildung liegt der CHAMP Satellit auf einem Labortisch bei der IABG in München. CHAMP ist komplett fertiggestellt und wartet auf den Einbau als Nutzlast für eine COMOS Trägerrakete zum Start vom russischen Plesetsk Kosmodrom. Oben rechts sieht man den am Institut für Navigation entwickelten abtastenden Laser (3D-LS), der aus verschiedenen Blickwinkeln die endgültige Form des CHAMP digital erfasst. Aus diesen Messungen wird ein „Virtueller CHAMP“ im Computer erzeugt, der unter anderem zur Modellierung von Oberflächenkräften genutzt werden kann. Bildquelle: Institut für Navigation.

CHAMP und GRACE

CHAMP ist ein in Deutschland unter der Leitung des Geoforschungszentrums Potsdam hergestellter Satellit, der im Jahre 2000 in eine genähert polare Umlaufbahn in einer Höhe von 450 Kilometern gebracht wurde. Auch CHAMP ist wie die vorstehend diskutierte Lasersatelliten ein Testkörper im Gravitationsfeld der Erde, allerdings wird die Bahn dieses Testkörpers nicht mehr von der Erde aus mit Lasermessungen erfasst (Abb. 12, 12a, 13).

Dafür sind im Sensorpaket des CHAMP unter anderem mehrere hochpräzise GPS Empfänger, deren Messungen die Bestimmung seiner Bahn mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern ermöglicht (vergl. oben stehenden Abschnitt über das GPS). Da die Positionsbestimmung mit dem GPS global möglich ist, kann auch die Bahn des CHAMP kontinuierlich und vollständig erfasst werden. Aufgrund der Erdrotation überfliegt der Satellit in jedem Umlauf einen anderen Teil der Erdoberfläche. Somit wird der Einfluss des Gravitationsfelds flächendeckend in der

Bahnhöhe des Satelliten vermessen. Während der geplanten Missionsdauer von fünf Jahren wird die Bahnhöhe auf 300 Kilometer verringert, um die Parameter des Gravitationsfeldes zu verbessern. Das Ergebnis der Mission wird ein homogenes Modell für das Gravitationsfeld einschließlich des Geoid sein, das bestehende Modelle teilweise um den Faktor 10 verbessert.

Bereits im Jahre 2002 wurde eine weitere Satellitenmission zur Bestimmung des Gravitationsfeldes unter dem Namen GRACE begonnen. Zwei identische Satelliten, die im Aufbau ähnlich dem CHAMP sind, fliegen auf genähert polaren Bahnen in einer Höhe von 490 Kilometern im Abstand von 220 Kilometern hintereinander. Auch hier wird die Bahn der beiden Satelliten mit speziellen GPS Empfängern vermessen. Zusätzlich jedoch messen die beiden Satelliten kontinuierlich den Abstand zueinander, und zwar mit der unglaublich hohen Genauigkeit von 0,01 Millimetern!

Aus der zeitlichen Änderung dieses Abstandes zusammen mit der Position der beiden Satelliten lässt sich das Gravitationsfeld der Erde und das Geoid mit einer im Vergleich zu CHAMP ungleich höheren Genauigkeit und basierend auf Messungen von viel kürzerer Dauer ableiten. Die Initiatoren der Mission, NASA und DLR, erwarten, dass bei voller Funktionsfähigkeit der Sensorik im monatlichen Rhythmus Geoidmodelle berechnet werden können und dass die dann auftretenden Veränderungen von Monat zu Monat Rückschlüsse auf Massenverlagerungen im Erdinneren, den Ozeanen und den eisbedeckten Gebieten der Erde zulassen werden.

Satelliten für die geodätische Fernerkundung – Geoinformation aus dem All

Die bisher vorgestellten Verfahren zur Nutzung von Satelliten in der Geodäsie beruhen alle auf Messungen von Richtungen oder Entfernungen zwischen Satelliten beziehungsweise zwischen Satelliten und Bodenstationen. Diese Messungen dienen der Bestimmung von Grundlagennetzen, der Bestimmung des Geoid und auch der Vermessung im lokalen Bereich. Im folgenden Abschnitt kommen wir nun zu einer ganz anderen Gruppe von Satelliten, die bildhafte Informationen über unseren Planeten bereitstellen.

Die Geschichte der Fernerkundungssatelliten geht zurück in die frühen 60er Jahre. In der damaligen Zeit des kalten Krieges wurden natürlich die Entwicklungen vor allem im militärischen Bereich vorangetrieben. Die ersten Satelliten trugen raumtaugliche Kameras, mit denen ganz konventionell die Erdoberfläche aus der Perspektive des Satelliten fotografiert wurde. War der Film komplett belichtet, wurde er nach unten ausgestoßen und im erdnahen Bereich aufgefangen. Auf diese Weise konnte großflächige militärische Aufklärung betrieben werden, ohne den Verlust von Aufklärungsflugzeugen zu riskieren: die Satelliten waren unerschickbar für Abwehrraketen.

Obwohl auch heute noch die militärische Aufklärung die schärfsten Augen im Weltraum hat, sind Fernerkundungssatellitendaten aus einer Reihe von zivilen Anwendungen auch nicht mehr wegzudenken. Einige Beispiele dieser diversen Anwendungen sind die Wettervorhersage, die Erfassung der Oberflächentemperatur der Weltmeere, die großräumige Beobachtung der Veränderungen der Biomasse und die Rohstoffexploration. Im vorliegenden Beitrag werden wir uns auf solche Fernerkundungssatelliten beschränken, deren Daten im Bereich von Geodäsie und Geoinformatik ihre Anwendung finden.

Die heute operationellen Fernerkundungssatelliten können unterteilt werden in Satelliten mit passiven und solchen mit aktiven Sensoren. Passive Sensoren erfassen die von der Erdoberfläche zurück gestreute Strahlung der Sonne. Je nach den physikalischen Eigenschaften des verwendeten Sensors entstehen so Bilder im Bereich des sichtbaren Lichts, in Teilen dieses Bereichs oder auch im Bereich des Infraroten. Typischerweise wird mit einem linearen digitalen Sensorfeld (Zeilenkamera) eine Pixelzeile quer zur Flugrichtung des Satelliten aufgenommen; wiederholte Aufnahmen ergeben so einen Bildstreifen unterhalb der Bahn des Satelliten. Die digitalen Daten werden vom Satelliten direkt zu Empfangsstationen auf der Erde gesandt, von wo aus sie dann zur Verarbeitung weitergeleitet werden.

Abbildung 14 zeigt einen der modernsten passiven Fernerkundungssatelliten, den von der Firma Space Imaging betriebenen Satelliten Ikonos. Ikonos umkreist die Erde in einer Höhe von 680 Kilometern und liefert Bilder mit einer Auflösung von einem Meter. Ein Ausschnitt eines



Abb. 14: Der Ikonos Satellit. Einer der modernsten optischen Fernerkundungssatelliten, dessen Daten für zivile Anwendungen zur Verfügung gestellt werden. Daten in verschiedenen Veredlungsstufen können vom Betreiber des Satelliten erworben werden. Bildquelle: Space Imaging Europe.

solchen Bildes ist in Abbildung 15 wieder gegeben.

Dieses Bild wurde hier gewählt, um den Detailreichtum solcher Fernerkundungsdaten zu demonstrieren. Es ist sicherlich leicht einsehbar, dass aus derartigen bildhaften Daten in den weniger entwickelten Ländern der so genannten Dritten Welt mit relativ wenig Zeit- und Bearbeitungsaufwand grundlegendes Kartenmaterial erstellt werden kann, eine der Hauptaufgaben der Geodäsie.

Jedoch auch in den entwickelten Ländern mit gutem Kartenmaterial haben solche Daten ihren Nutzen. Da die Fernerkundungssatelliten in regelmäßigen Abständen die gleichen Gebiete wiederholt abbilden, zeigt der Vergleich der Aufnahmen direkt die Veränderungen in der Oberflächentextur und -geometrie. Dies wiederum wird ist die kontinuierliche Fortführung bereits existierender Kartenwerke von Bedeutung.

Satelliten mit passiven Fernerkundungssensoren haben gewisse Limitationen: bildhafte Information kann nur auf der von der Sonne beschienenen Seite der Erde erfasst werden, und auch nur dann, wenn keine Wolken den Einblick verwehren. Diese Einschränkungen werden bei Fernerkundungssatelliten durch den Einsatz von aktiven Radar-Sensoren überwunden.

Radar-Fernerkundungssensoren „beleuchten“ das Zielgebiet mit Mikrowellen-signalen. Das Signal wird von allen Objekten im Bereich der Ausleuchtung der Radarkule zurückgestreut; die Rückstreuungen überlagern sich zu einem Gesamtsignal, das wiederum am Satelliten empfangen wird. Im Verlauf eines Überflugs werden alle Objekte in einem Aufnahme-streifen mehrfach „beleuchtet“, und aus der aufgezeichneten Sequenz von Rückstreu-signalen wird rechnerisch ein Abbild des überflogenen Streifens erzeugt. Dieses Bild zeigt in Grautönen die Intensität des zurückgestreuten Mikrowellensignals. Da die Ausbreitung von Mikrowellen nur geringfügig von Wolken beeinflusst wird, sind Radarsensoren wetterunabhängig. Dem gegenüber steht bisher der Nachteil, dass Radardaten nicht die hohe Auflösung von optischen Daten erreichen.

Werden anstelle der Intensitäten der zurückgestreuten Signale deren Phasen rechnerisch verarbeitet, so können bei mehrfachen Aufnahmen des gleichen Gebiets mit der Methode der Radarinterferometrie auch digitale Geländemodelle berechnet werden. Abbildung 16 zeigt das U.S. Space Shuttle während einer Mission zur Datenerfassung für ein globales digitales Geländemodell (Shuttle Radar Topography Mission). Bei dieser Mission befand sich die Radarsendeantenne in der nach unten zeigenden geöffneten Shuttle Bay; sowohl dort als auch am Auslegerarm befinden sich Radarempfangsantennen.

Ein Auszug aus dem Ergebnis einer früheren Shuttle Mission ist in Abbildung 17 dargestellt. Aus den in einer Höhe von 220 Kilometern erfassten Radardaten ist ein digitales Geländemodell für einen Ausschnitt des Galapagos Archipels gerechnet und farblich kodiert dargestellt worden. Offensichtlich kann mit dieser Methode eine höhenmäßige Kartierung zum Beispiel von unzugänglichen Gebieten erfolgen, ohne diese Gebiete jemals zu betreten.



Abb. 15: Ein Bild des Satelliten Ikonos aus 680 Kilometern Höhe. Dargestellt ist ein Ausschnitt aus einem Bildstreifen, der einen Teil der Stadt Frankfurt am Main zeigt. Man beachte den Reichtum an Detailinformation. Bildquelle: Spaceimaging Europe.



Abb. 16: Space Shuttle mit Radar Antennen. Radar Sensoren sind auch im Space Shuttle während der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) eingesetzt worden. Ziel dieser Mission war die Gewinnung von Daten zur Erstellung eines genauen und homogenen globalen Digitalen Geländemodells (DGM). Bildquelle: Deutsches Zentrum Für Luft- und Raumfahrt.

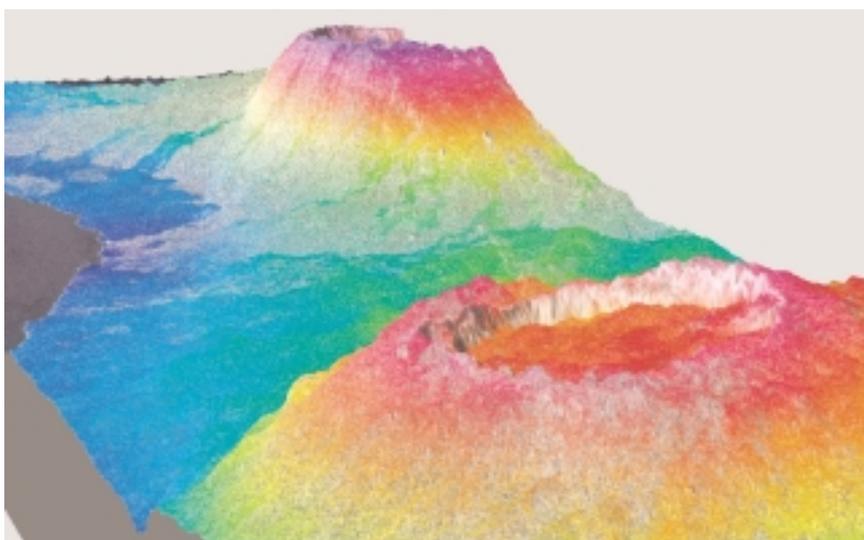


Abb. 17: Galapagos Archipel. Ein digitales Geländemodell zweier Komplexe des Galapagos Archipels aus Radarfernerkundungsdaten. Die Höheninformation ist farblich kodiert: Blau dargestellt ist das Gelände auf Meeressniveau, Purpur-Rot sind die Bereiche der Vulkankraterspitzen. Bildquelle: Institut für Navigation.

Die Phasen der zurückgestreuten Signale reagieren sehr sensitiv auf Veränderungen der zurückstreuenden Oberfläche. Ändert sich diese Oberfläche zwischen zwei aufeinander folgenden radarinterferometrischen Aufnahmen, so lassen sich diese Oberflächenveränderungen aus den Radaraufzeichnungen ermitteln.

Als Beispiel für dieses Verfahren ist in Abbildung 18 das Ergebnis der Auswertung vor Radardaten der ERS1/2 Satelliten dargestellt. Zu sehen ist im Hintergrund das Grautonbild der Rückstrahlung des Radarsignals in einem Eisfeld der Antarktis. Dem Grautonbild überlagert sind rote Pfeile, die die Kriechgeschwindigkeit des Eises charakterisieren. Dieses Geschwindigkeitsfeld wurde aus den Daten mehrerer Satellitenüberflüge gerechnet. Somit ermöglicht die Radarfernerkundung unter anderem die Erfassung der Eismassenveränderung der Antarktis aus einer Entfernung von mehreren Hundert Kilometern aus der Bahnhöhe eines Satelliten.

Ausblick

Der Artikel hat anhand von einzelnen Beispielen den Einfluss der Satellitenmessverfahren auf Geodäsie und Geoinformatik dargestellt. Die Darstellung war gegliedert in die drei Bereiche

- geodätische Grundlagennetze
- Gravitationsfeld/Geoid
- Geoinformation.

Obwohl in allen drei Bereichen Fortschritte gemacht wurden, die noch vor zehn Jahren unvorstellbar waren, ist die Entwicklung noch längst nicht zu einem Ende gekommen. Im ersten Bereich steht

in den nächsten fünf Jahren die Entwicklung des europäischen Pendant zum GPS an. Die ersten Satelliten des Systems GALILEO sollen 2008 im Orbit ihren Dienst verrichten. Dann werden mindestens doppelt so viele Satelliten wie heute auch für geodätische Zwecke zur Verfügung stehen. Im zweiten Bereich laufen die Vorbereitungen für die Mission GOCE. Mit dieser Mission soll erstmals das Prinzip der Gravitationsfeldgradiometrie zur Aufspürung noch feinerer Details des Gravitationsfeldes der Erde angewandt werden. Im letzten Bereich schließlich werden Radarsatelliten mit hoher Auflösung entwickelt; in Europa zum Beispiel des System TerraSAR. Dieser Satellit wird vollkommen neue Möglichkeiten für die kontinuierliche Beobachtung von Veränderungen der Erdoberfläche bieten.

Diese Entwicklungen sind allesamt aufgrund der Komplexität und auch der notwendigen finanziellen Mittel nur im internationalen Verbund durchführbar. Die Institute des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik sind in unterschiedlicher Schwerpunktsetzung mit Projekten in diese Forschungs- und Entwicklungsarbeiten eingebunden.

Die oben beschriebene rapide Entwicklung in den letzten Dekaden hat natürlich auch grundlegend die Lehrinhalte des universitären Studiums beeinflusst. Als der Autor gegen Ende der 70er Jahre selbst das Fach Geodäsie studierte, wurde der Bereich der Nutzung von Messungen mit/zu künstlichen Satelliten im Hauptstudium umfassend im Rahmen einer Doppelstunde abgehandelt. Heute nimmt im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Stuttgart in fast jedem Fach des Hauptstudiums die Methodik und die Datenerfassung und -verarbeitung der Satellitengeodäsie und der Satellitennavigation einen Großteil der Lehrveranstaltung in Anspruch.

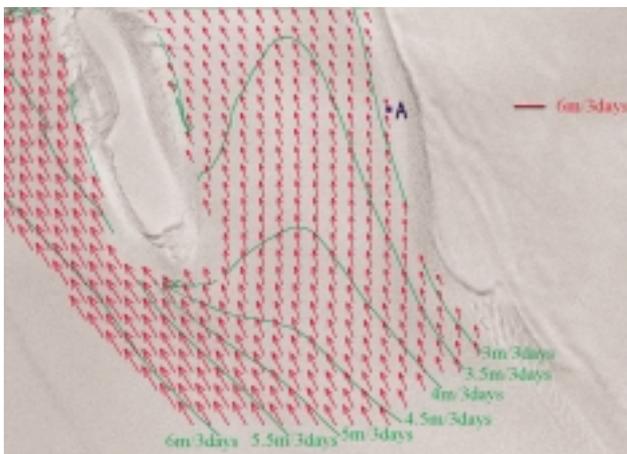


Abb. 18: Bewegung von Eisflächen in der Antarktis. Die roten Pfeile zeigen die Kriechgeschwindigkeit des Eises. Die längsten Pfeile im unteren Bereich entsprechen Geschwindigkeiten von zwei Metern pro Tag in Richtung Nordwesten. Bildquelle: Institut für Navigation.

Literatur

- Bialas, V. (1982), Erdgestalt, Kosmologie und Weltanschauung. Wittwer, Stuttgart
 Kaula, W. (1966), Theory of Satellite Geodesy. Blaisdell Publ. Comp., London
 Seeber, G. (2003), Satellite Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin
 Smil, V. (2003), The Earth's Biosphere. MIT Press, Cambridge
 Torge, W. (2003), Geodäsie. Walter de Gruyter, Berlin



Prof. Dr.-Ing. Alfred Kleusberg

wurde am 3. Oktober 1949 in Eillingen (NRW) geboren. Er studierte von 1971 bis 1974 Vermessungswesen an der Fachhochschule Recklinghausen und von 1974 bis 1978 Geodäsie an der Technischen Universität Berlin mit dem Abschluss Diplomingenieur. Nach dem Studium war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität der Bundeswehr in München-Neubiberg sowie an der Universität Stuttgart, wo er im Jahr 1984 promovierte. Der Promotion folgte ein 13-jähriger Aufenthalt in Kanada: bis 1987 als Postdoctoral Research Associate an der University of New Brunswick (UNB), dann bis 1989 als Research Fellow des Natural Sciences and Engineering Research Council und anschließend als Professor am Department of Geodesy and Geomatics Engineering der UNB. Zum 1. April 1997 wurde Alfred Kleusberg zum Professor und Direktor des Instituts für Navigation der Universität Stuttgart berufen.