

# Erdsatelliten als Mittel zur Erforschung der globalen Geodynamik

Autor(en): **Hugentobler, Urs**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **61 (2003)**

Heft 316

PDF erstellt am: **24.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-898404>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Erdsatelliten als Mittel zur Erforschung der globalen Geodynamik

URS HUGENTOBLER

Mit dem Beginn des Raumfahrtzeitalters mit dem Start von Sputnik I am 4. Oktober 1957 wurde eine neue Technik der Erdvermessung möglich. Die Satelliten als Probekörper im Schwerfeld der Erde erlauben die Bestimmung der Masseverteilung im Erdinnern. Zudem lassen sich die künstlichen Himmelskörper als Referenzpunkte für die Vermessung der Erde verwenden. Grundlage dazu ist die genaue Vermessung der Bahnen der Satelliten. Mittels raumgestützter geodätischer Verfahren lassen sich heute z.B. die Kontinentalverschiebungen messen oder Rückschlüsse über Prozesse im Erdinnern ziehen. Zudem liefern sie die Grundlage zur Definition eines globalen terrestrischen Koordinatensystemes oder zum Einschleichen einer Schaltsekunde. Der Artikel stellt geodätische Satelliten-Messtechniken vor und zeigt einige Resultate und Anwendungen am Beispiel des Global Positioning Systems (GPS).

## Anfänge der Vermessung mit Satelliten

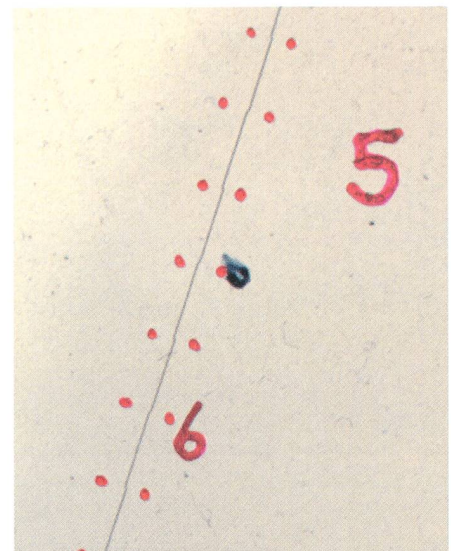
In den Anfängen der Raumfahrt wurden zur Bestimmung genauer Satellitenbahnen hauptsächlich optische Beobachtungen verwendet. Ganz zu Beginn waren sogar visuelle Beobachtungen und Winkelmessungen mit Theodoliten hilfreich zur Verbesserung der Bahnmodelle. So wurden z.B. 1957 im Moonwatch Projekt des Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) Amateurastronomen aufgefordert, Satellitenbeobachtungen mit Zeit- und Ortsangabe zu melden. Bereits 1958 hatte das SAO ein globales Beobachtungsnetz in Betrieb, bestehend aus zwölf Observatorien, welche zur Satellitenvermessung mit speziellen Kameras, sogenannten Baker-Nunn-Kameras, ausgerüstet waren.

Im Jahre 1961 wurde der erste Ballonsatellit Echo 1 mit einem Durchmesser von 30 m in eine Umlaufbahn gebracht. 1964 folgte Echo 2 mit einem Durchmesser von 40 m. Die beiden passiven Satelliten, welche Telekommunikationsexperimenten dienten, wurden auch für geodätische Messungen gebraucht. Der Ballonsatellit PAGEOS (Passive Geodetic Satellite) mit einem Durchmesser von 30 m wurde 1966 speziell für geodätische Anwendungen gestartet (Geodäsie = Erdvermessung). Er diente als Triangulationspunkt im Raum zur Vermessung von 45 global verteilten und mit von Wild-Heerbrugg entwickelten BC4-Kameras bestückten Messstationen. Winkelmessungen, möglichst gleichzeitig von verschiedenen Stationen aus gemacht, erlaubten erstmals die Vermessung eines weltweiten Triangulationsnetzes mit einer Genauigkeit von wenigen Metern. Daneben dienten die Messungen zur Verbesserung von Modellen des Schwere-

feldes der Erde sowie der Dichte der Atmosphäre in der Höhe der Satelliten aus der Bestimmung der Bremswirkung durch Luftreibung. Beides erlaubte eine genauere Berechnung der Bahnen auch anderer Satelliten.

Zur optischen Vermessung von Satelliten wurden photographische Weitwinkelkameras verwendet. Interessant ist die dreiaxiale Montierung der Baker-Nunn-Kamera: Mittels Drehung um zwei Achsen konnte das Instrument so gelegt werden, dass der Satellit längs seiner Bahnbewegung verfolgt werden konnte durch Nachführung des Teleskopes um die dritte Achse. Strichspuren wurden z.B. mittels rotierender Blenden mit Zeitmarken versehen. Neben passiven (das Sonnenlicht reflektierende) Satelliten gab es aber auch aktive Satelliten wie ANNA-1B (1962), GEOS-1 (1965), GOES-2 (1968), welche mittels Blitzlampen Serien von kurzen Lichtpulsen generieren konnten. Diese Lichtpulse mussten dann auf den photographischen Aufnahmen gefunden und vermessen werden. Zeitsynchrone Messungen von verschiedenen Observatorien aus wurden durch diese Technik garantiert.

Zwischen 1965 und 1974 wurde auch die Schmidt-Kamera des Astronomischen Institutes Bern in Zimmerwald (40 cm Öffnung, 104 cm Brennweite) zur geodätischen Vermessung der Satelliten Echo 1 und 2, PAGEOS, GEOS 1 und 2 verwendet im Rahmen des WEST (West European Satellite Triangulation) Projektes. Mithilfe einer planparallelen Glasplatte, welche synchronisiert mit der Stationsuhr hin- und hergekippt wurde, wurden die Strichspuren der Satelliten auf den Schmidtplatten mit Zeitmarken versehen (siehe Figur 1). Damit wurde Zimmerwald schon damals zum bestvermessenen Punkt in der Schweiz.

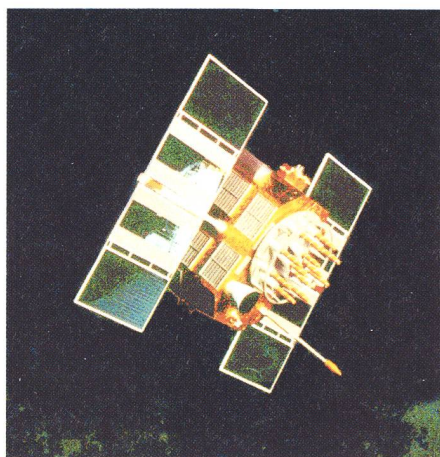


Figur 1: Ausschnitt aus einer Strichspuraufnahme des Ballonsatelliten PAGEOS vom 4. Oktober 1971 mit der 40 cm Schmidt-Kamera des Observatoriums Zimmerwald. Die roten Punkte bezeichnen Zeitmarken, welche mit einer vor der Filmkassette hin- und herkippenden Glasplatte aufgebracht wurden. Ziffern bezeichnen Referenzsterne für die astrometrische Vermessung der Satellitenspur.

## Neue Messtechniken

Infolge der aufwendigen Verarbeitung photographischer Beobachtungen wurden astrometrische Messverfahren für geodätische Anwendungen nach und nach durch andere Techniken ersetzt. Bereits bei den ersten in Umlauf gebrachten Satelliten dienten Telemetriedaten zur Bahnbestimmung und damit zur besseren Vermessung des Erdschwerfeldes. Für geodätische Anwendungen entwickelte Transponder-techniken wurden bereits 1962 beim Satelliten ANNA-1B eingesetzt. Die Ausstrahlungen des Satelliten konnten für präzise Dopplermessungen verwendet werden. 1960 wurden der erste TRANSIT-Satellit in den Orbit gebracht. Die Satelliten der TRANSIT-Serie der US Navy führten frequenzstabile Sender mit und dienten zur Navigation mittels Dopplersignalen. Ab etwa 1967 wurden diese Satelliten auch für geodätische Anwendungen eingesetzt. Das Observatorium Zimmerwald beteiligte sich an mehreren TRANSIT-Messkampagnen. Das TRANSIT-System blieb operationell bis 1996, als es durch GPS (Global Positioning System) ersetzt wurde.

Schon bald nach dem Bau des ersten Lasers durch MAIMAN im Jahre 1960 wurden Laser verwendet zur Distanzmessung zu Satelliten. Der erste mit Laser-Retroreflektoren ausgerüstete Satellit war Explorer 22, der 1964 ge-



Figur 2: GPS-Satellit der Block II A-Serie.

startet wurde. Noch im selben Jahr hat die NASA erfolgreich Laser-Echos des Satelliten gemessen. Heute werden immer mehr Satelliten mit Reflektoren ausgerüstet. Sehr erfolgreich waren und sind die speziell für geodätische Anwendungen entwickelten kugelförmigen Satelliten wie LAGEOS (Laser GEodetic Satellite) 1 und 2 oder Starlette. Diese Satelliten spielten und spielen eine Schlüsselrolle bei der Vermessung des Gravitationsfeldes der Erde und bei der Untersuchung von geophysikalischen Prozessen. Heute sind weltweit rund 30 Laser-Stationen im Betrieb, eine davon in Zimmerwald.

Für raumgestützte geodätische und geodynamische Anwendungen werden heute in erster Linie Beobachtungen von SLR (Satellite Laser Ranging), GPS und VLBI (Very Long Baseline Interferometrie) verwendet. Im folgenden sollen am Beispiel des GPS einige Resultate der Erdvermessung vorgestellt werden.

### Wie funktioniert GPS?

Das Global Positioning System (GPS) dient der globalen Navigation und wird von der US Air Force betrieben. Der erste Satellit der NAVSTAR GPS-Serie wurde 1978 gestartet, und 1995 war die Konstellation, bestehend aus nominell 24 Satelliten, komplett und wurde seither laufend erneuert. Gegenwärtig befinden sich 29 aktive GPS-Satelliten im Orbit. Die Satelliten sind auf sechs Bahnebenen verteilt, welche  $55^\circ$  gegen den Äquator geneigt sind und deren aufsteigende Knoten um je  $60^\circ$  verschoben sind (siehe Figur 3). Sie umkreisen die Erde auf fast kreisförmigen Bahnen in einer Höhe von rund 20 000 km, die Umlaufzeit beträgt fast genau ein halber Sterntag ( $11^h58^m$ ).

Ein GPS-Satellit trägt als wichtigsten Teil der Nutzlast Atomuhren mit sich. Mit einem Sender verbreitet er

einerseits Bahnelemente, aus denen ein Empfänger seine momentane Position errechnen kann. Andererseits übermittelt er den Stand der Uhr, so dass der Empfänger durch Vergleich dieser Information mit der Ablesung seiner internen Uhr die Laufzeit und damit die Distanz zum Satelliten bestimmen kann. Theoretisch reichen so gleichzeitige Messungen von drei GPS-Satelliten, damit der Empfänger seine Position im Raum errechnen kann. In praxi werden die Beobachtungen eines vierten Satelliten benötigt, so dass der Empfänger seine interne (Quarz-)Uhr synchronisieren kann. Mit mindestens vier Satelliten kann ein Empfänger somit seine Position überall auf oder in der Nähe der Erde bestimmen.

Trotz seiner primär militärischen Bestimmung kann das System auch für zivile Anwendungen verwendet werden, da ein Teil der ausgesendeten Information nicht verschlüsselt ist. Bis zum 2. Mai 2000 erreichte ein ziviler Nutzer des Systems eine Positioniergenauigkeit von ca. 300 m. Ab diesem Datum wurde eine künstliche Verschlechterung der Satellitenuhren definitiv ausgeschaltet, so dass seither einem zivilen Anwender die Positionierung in Echtzeit auf etwa 3 m genau gelingt, was für viele Anwendungen, z.B. für Navigation mit Auto, Schiff oder Flugzeug, ausreichend ist. Die verschlüsselte und nur dem militärischen Nutzer verfügbare Information erlaubt eine Positioniergenauigkeit in Echtzeit von ca. 30 cm.

Für geodätische Anwendungen sind sowohl 3 m als auch 30 cm Messgenauigkeit zu ungenau. Daher werden für hochpräzise Messungen direkt die auf zwei Frequenzen im Gigahertz-Bereich (Wellenlängen 19 cm und 25 cm) ausgesendeten Trägerwellen verwendet. Durch geeignete Auswertestrategien und Algorithmen können damit Genau-

igkeiten von wenigen Millimetern erreicht werden. Diese Methoden sind aufwendig und erfordern relativ grosse Rechenleistungen. Bestimmt werden müssen unter anderem die Satellitenbahnen, Uhrfehler der Satellitenuhren und der Einfluss der atmosphärischen Refraktion (Laufzeitverzögerung) auf die Mikrowellensignale.

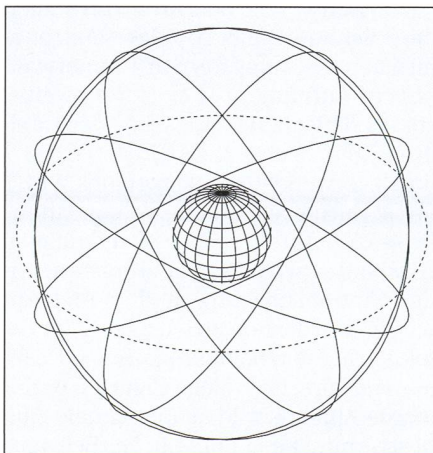
Neben dem amerikanischen GPS-Satellitensystem ist ein russisches Pendant, das GLONASS-System, im Orbit. Leider sind gegenwärtig nur 11 Satelliten funktionstüchtig, und die Zukunft dieses Navigationssystemes ist ungewiss. Die EU und ESA planen zusammen ein europäisches Gegenstück zum GPS. Dieses System soll aus 24 Satelliten bestehen und gegenüber GPS wesentliche Verbesserungen aufweisen. Die ersten Satelliten sollen 2006 gestartet werden.

### Ein globales Netz von Empfängern

Gegen Ende der 80er Jahre wurde klar, dass zum Erreichen von höchster Messgenauigkeit die von den GPS-Satelliten ausgesendete Bahninformation zu wenig genau ist. Damit nicht jeder Anwender seine eigenen Bahnen rechnen muss, wurde der IGS (International GPS Service) Dienst gegründet. Im Juni 1992 wurde der Testbetrieb aufgenommen, und im Januar 1994 begann der IGS mit dem routinemässigen Bereitstellen von präzisen GPS-Bahnen. Grundlage für die Berechnungen sind Messungen aus einem globalen Netz von fest montierten GPS-Empfängern. Mittlerweile sind über 350 Stationen im Betrieb (siehe Figur 4), welche von Dutzenden von Institutionen betrieben werden. Die Messungen dieser Stationen werden an mehreren Datenzentren gespeichert und über das Internet online zur Verfügung gestellt. Sieben Analysezentren berechnen jeden Tag Satellitenbahnen, Stationskoordinaten und weitere relevante Informationen und machen sie dem IGS verfügbar, welcher daraus gemittelte Bahnen rechnet und im Internet zur Verfügung stellt.

Eines der Analysezentren, das Center for Orbit Determination in Europe (CODE), wird am Astronomischen Institut der Universität Bern betrieben in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Landestopographie in Wabern, dem deutschen Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt a.M. und dem französischen Institut Géographique National in Paris. Das Rechenzentrum CODE spielt im IGS seit Beginn eine wesentliche Rolle. Die mit eigener Software gerechneten Resultate können sich in ihrer Qualität mit den

Figur 3: Bahnen der GPS-Satelliten, massstabsgetreu mit der Erdkugel.





Figur 4: Permanentes GPS-Messnetz des IGS (International GPS Service) bestehend aus über 350 Empfängern.

dessen Variabilität in der Ionosphäre untersucht werden. Da die Elektronen durch UV-Strahlung der Sonne erzeugt werden, kann in der Elektronenzahl sehr schön die Sonnenaktivität abgelesen werden.

### Bewegliche Erdkruste

Beim Berechnen der Satellitenbahnen müssen auch die Koordinaten der Messstationen sowie die Transformationsparameter vom erdfesten System ins Inertialsystem (Erdrotationsparameter) bestimmt werden. Damit fallen täglich Koordinaten der global verteilten Stationen an mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern. Aus den langjährigen Koordinaten-Zeitserien lassen sich Geschwindigkeiten der einzelnen Stationen bestimmen. Figur 5 zeigt die horizontalen Geschwindigkeitsvektoren einiger am CODE verarbeiteten Stationen. Klar zum Vorschein kommt die Verschiebung der einzelnen tektonischen Platten, wie dies in den 20er Jahren von ALFRED WEGENER postuliert wurde. So verbreitert sich z.B. der Atlantik um ca. 2.5 cm pro Jahr. Für einzelne Gebiete erreichen die «Geschwindigkeiten» 10 cm pro Jahr.

Bei der Interpretation der Messresultate müssen neben den Plattenbewegungen noch andere Stationsbewegungen berücksichtigt werden. Einerseits sind dies die Gezeiten der festen Erde. In der Schweiz bewegt sich der Erdboden um  $\pm 15$  cm auf und ab im Rhythmus der Gezeiten. Diese Bewe-

| Beschleunigung durch               | Beschleunigung<br>m/s <sup>2</sup> | Bahnfehler<br>nach einem Tag |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Schwerkraft der Erde               | 0.59                               | 165 000 km                   |
| Abplattung der Erde                | $5 \cdot 10^{-5}$                  | 10 km                        |
| Anziehung durch den Mond           | $5 \cdot 10^{-6}$                  | 3 km                         |
| Anziehung durch die Sonne          | $2 \cdot 10^{-6}$                  | 800 m                        |
| Weitere Terme des Erdschwerefeldes | $3 \cdot 10^{-7}$                  | 200 m                        |
| Direkter Strahlungsdruck           | $9 \cdot 10^{-8}$                  | 20 m                         |
| Weitere Terme im Strahlungsdruck   | $5 \cdot 10^{-10}$                 | 2 m                          |
| Gezeiten der festen Erde           | $1 \cdot 10^{-9}$                  | 0.3 m                        |

Tabelle 1: Auf GPS-Satelliten wirkende Beschleunigungen und zu erwartender Bahnfehler nach einem Tag bei deren Vernachlässigung.

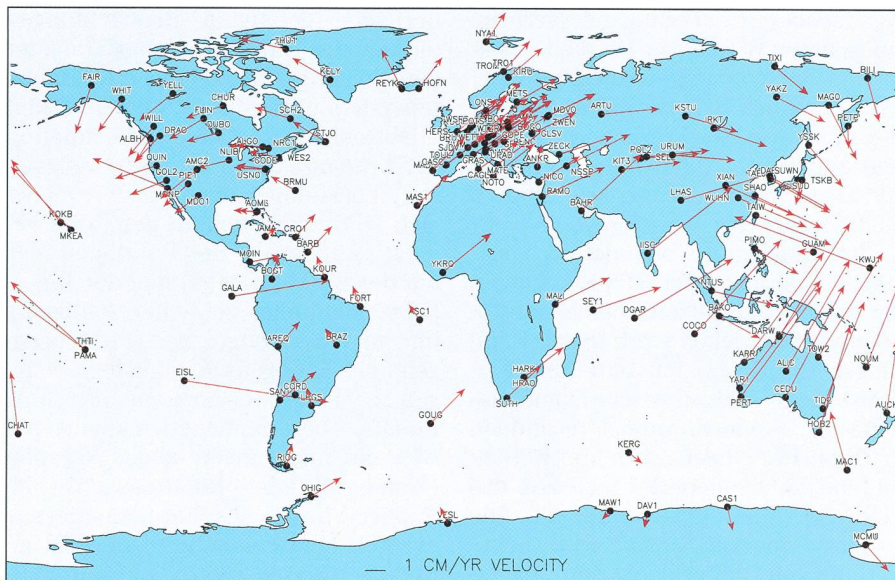
«Konkurrenten» von z.B. JPL/NASA oder ESA vergleichen lassen. Die Bernese GPS Software steht heute an über 200 Institutionen und Universitäten für präzise GPS-Auswertungen im Einsatz.

Die Bahnen der GPS Satelliten müssen jeden Tag neu gerechnet werden, da infolge von Störungen durch Sonne, Mond, Unregelmässigkeiten im Erdschwerefeld und sogar Strahlungsdruck der Sonne sich die Bahnen dauernd ändern. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Störkräfte und deren Wirkung auf die Bahn innerhalb eines Tages. Besonders heikel zu berechnen ist die kleine Kraft, welche das auf Solargenerator und Satellitenkörper auftreffende Sonnenlicht erzeugt. Hierzu sind genaue Kenntnisse über die Orientierung der Satelliten und die Oberflächeneigenschaften der beleuchteten Flächen nötig. Tatsächlich ist der Strahlungsdruck der limitierende Faktor bei der GPS-Bahnmodellierung. Trotzdem werden heute im IGS täglich Satellitenbahnen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern gerechnet, und das bei Satelliten mit rund sechs Metern Spannweite.

GPS hat neben geodätischen eine ganze Palette von weiteren Anwendungen. So können beispielsweise mittels der Satellitensignale Atomuhren auf ver-

schiedenen Kontinenten im Nanosekundenbereich miteinander verglichen werden. Da die Mikrowellensignale der Satelliten durch die Erdatmosphäre beeinflusst werden, kann einerseits die Refraktivität der Troposphäre und damit der Wasserdampfgehalt über den Messstationen bestimmt werden, andererseits kann der Elektronengehalt und

Figur 5: Horizontale Geschwindigkeitsvektoren von 49 GPS-Stationen des IGS Netzes.

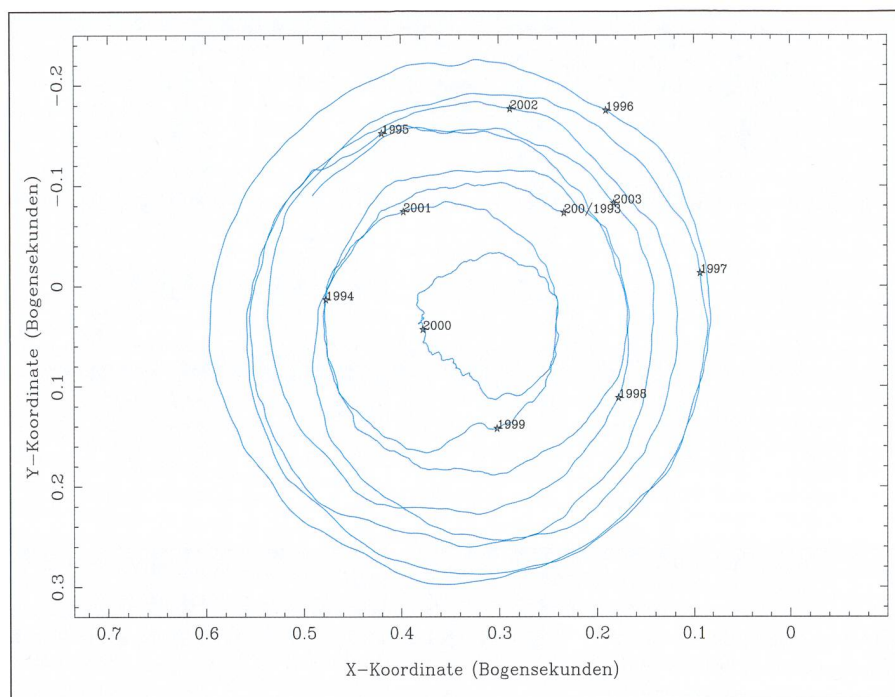


gung kann mit GPS präzise gemessen werden. Gezeiten wirken also nicht nur auf das Wasser, wie landläufig oft vermutet. Als zweiter, die Stationspositionen beeinflussender Effekt sei der Auflasteffekt durch ozeanische Gezeiten erwähnt: Infolge des Wasserdruckes auf die Erdkruste bei Flut kann sich eine Küstenstation im Extremfall um  $\pm 10$  cm in vertikaler Richtung bewegen. Schliesslich sei der atmosphärische Auflasteffekt erwähnt: Durch den sich ändernden Luftdruck und damit Druck auf die Erdkruste verändert sich die Höhe um rund 0.3 mm/mbar. Die Höhe kann sich dadurch durchaus um 1 cm verändern. Der Boden unter unseren Füßen ist also nicht wirklich starr. Alle die genannten Effekte können mit GPS gemessen werden, was eine Verbesserung der entsprechenden Modelle erlaubt, z.B. der Elastizität der Erdkruste.

Beim Anblick der Figur 5 stellt sich sofort die Frage nach dem Koordinatensystem, bezüglich welchem die Geschwindigkeiten dargestellt sind. Tatsächlich werde solche Resultate von den verschiedenen geodätischen Raumverfahren – SLR, GPS, VLBI – verwendet, um ein globales terrestrisches Koordinatensystem, das ITRF (International Terrestrial Reference Frame) zu definieren und zu kontrollieren, eine Aufgabe, die vom IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) wahrgenommen wird.

Ein Koordinatensystem setzt sich aus zwei Teilen zusammen: (1) seiner Definition und (2) seiner Realisierung. Die Definition klärt Fragen zum Nullpunkt und Orientierung des Systemes. So soll sich z.B. die Erdkruste im Mittel gegenüber diesem Koordinatensystem nicht drehen. Die Realisierung des Systemes befasst sich mit der Verfügbarkeit dieses Koordinatensystemes für Anwender aller Art, z.B. für Landesvermessungsämter. Hierzu werden die Koordinaten von wohldefinierten Stationen, z.B. permanenten GPS-Messpunkten des IGS mit hoher Präzision bestimmt und publiziert. Über feinmaschigere GPS-Netze werden diese Koordinaten weiterverbreitet.

In Zimmerwald befindet sich seit 1992 ein permanenter GPS-Empfänger, der von der Schweizerischen Landestopographie betrieben wird. Dieser Empfänger ist IGS-Station und Referenzpunkt für die schweizerische Landesvermessung. Seine Koordinaten sind im ITRF präzise eingemessen und werden laufend kontrolliert. Er realisiert das ITRF für die Landeskoordinaten. Die Landesvermessung LV95 wird heute mithilfe von GPS gemacht mit Zimmer-



Figur 6: Bewegung des Rotationspoles auf der Erdoberfläche von Juli 1993 bis April 2003, gemessen mit GPS. Der Pol bewegt sich in einem Kreis mit 15 m Durchmesser um den mittleren Pol (1 Bogensekunde entspricht 30 m auf der Erdoberfläche).

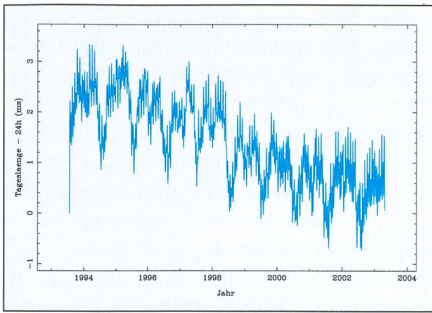
wald als Referenzpunkt. Der Zimmerwalder Empfänger ist auch Teil des Automatischen GPS-Netzes der Schweiz (AGNES), das ebenfalls von der Schweizerischen Landestopographie betrieben wird und heute aus 29 über das ganze Land verteilten permanenten GPS-Stationen besteht. Dieses Netz dient der Landesvermessung mit GPS, aber auch anderen Anwendungen wie Positionierung in Echtzeit z.B. im Katasterwesen, Navigation oder auch für meteorologische Anwendungen.

### Variable Erdrotation

Beim Bestimmen der Bahnparameter für die GPS-Satelliten (im inertialen Raum gegeben) mittels von der Erdoberfläche getätigten Beobachtungen müssen die Transformationsparameter vom erdfesten ins raumfeste Koordinatensystem mitbestimmt werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Rotation der Erde und deren Unregelmässigkeiten zu bestimmen. Insbesondere eignet sich GPS zum Studium der Polbewegung (Wanderung der Rotationsachse auf der Erdoberfläche) und der Tageslänge mit hoher zeitlicher Auflösung und mit einer Genauigkeit von wenigen zehntel Millibogensekunden resp. wenigen zehn Mikrosekunden pro Tag. Ebenfalls bestimmt werden können mit GPS die Änderungen in der Nutation (Wanderung der Rotationsachse im Raum). Für die absolute Orientierung der Achse im Raum muss auf VLBI zurückgegriffen werden, denn nur VLBI

hat über die Vermessung von entfernten Quasaren mit radiointerferometrischen Techniken direkten Zugriff auf die absolute Orientierung der Erde im Inertialsystem.

Figur 6 zeigt die Bewegung der Rotationsachse am Nordpol von Sommer 1993 bis Frühjahr 2003. Der Pol wandert in einem Kreis mit variablem Radius um einen mittleren Pol innerhalb eines Gebietes mit einem Durchmesser von etwa 15 m. Von einem Tag zum nächsten verschiebt sich der Pol um bis zu 11 cm. Markierung des Rotationspoles mit einer Fahne im Eis ist somit nicht sehr sinnvoll. Einen ganzen Umlauf um den mittleren Pol vollführt der Rotationspol innerhalb von rund 430 Tagen, der sogenannten Chandlerschen Periode nach CHANDLER, der 1891 die Periode in der Polbewegung gefunden hat. Diese Polbewegung wurde bereits von EULER 1765 aufgrund seiner Studien der Kreisbewegung vorhergesagt. Die Periode beträgt nach dieser Rechnung allerdings 303 Tage. Der Ursprung dieser grossen Differenz zwischen der Eulerschen und der Chandlerschen Periode liegt in der Elastizität der Erde begründet. Dieser Unterschied ist einer der eindrucklichsten Beweise, dass wir auf einem elastischen Planeten und nicht auf einem starren Körper leben. «Unebenheiten» in der Polbewegung sowie der variable Radius können zu einem guten Teil auf Drehimpulsaustausch der festen Erde mit der Atmosphäre zurückgeführt werden.

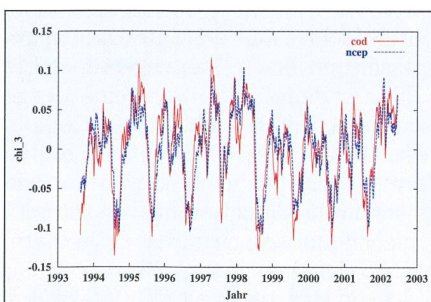


Figur 7: Tageslängenvariationen (minus 24 h) für ein Zeitintervall von Juli 1993 bis April 2003, gemessen mit GPS am CODE Rechenzentrum.

Die Tatsache, dass die Erde nicht starr ist, führt zusammen mit äusseren Kräften, ausgeübt durch Mond und Sonne, zu Variationen in der Tageslänge. Figur 7 zeigt die Tageslänge (minus 24 Stunden) als Funktion der Zeit über einen Zeitraum von fast zehn Jahren. Feststellen kann man Variationen mit unterschiedlichen Perioden. Vierzehntägliche Variationen in der Tageslänge mit einer Amplitude um 0.5 ms werden durch die Gezeitendeformation der Erde verursacht.

Deutlich sichtbar in Figur 7 ist eine Variation mit einer jährlichen Periode und einer Amplitude von etwa 1 ms. Diese saisonalen Schwankungen der Erdrotation können der Wechselwirkung der festen Erde und der Atmosphäre zugeschrieben werden. Wird nämlich der Drehimpuls der Erdrotation mit jenem der Atmosphäre verglichen, wobei letzterer anhand von globalen Daten von Wettermodellen aus Druckwerten und Windgeschwindigkeiten gerechnet werden kann, so stellt man eine sehr hohe Korrelation zwischen den beiden Zeitserien fest. Dies wird in Figur 8 gezeigt, in welcher einerseits die aus der mit GPS gemessenen Tageslängenva-

Figur 8: Vergleich der axialen Drehimpulsfunktionen der festen Erde bestimmt aus gemessenen Tageslängenvariationen (rot) und der Atmosphäre, gerechnet mithilfe von Druck- und Winddaten aus globalen Wettermodellen (grün). Ein Polynom zweiten Grades wurde von beiden Zeitreihen subtrahiert.



riation berechnete sogenannte axiale Drehimpulsfunktion (rote Kurve) zusammen mit der analogen Funktion gerechnet aus Wettermodellen (grüne Kurve) übereinandergelegt sind. Von beiden Funktionen wurde ein Polynom zweiten Grades subtrahiert. Bei der zweiten Funktion wurde das Vorzeichen gedreht, da die beiden Funktionen gegeneinander laufen, so dass der totale Drehimpuls von fester Erde und Atmosphäre konstant bleibt. Die Übereinstimmung der beiden Funktionen ist frappant, so dass der Schluss gezogen werden kann, dass der fast ausschliessliche Grund der saisonalen Variationen der Tageslänge die Wechselwirkung der Erde mit der Atmosphäre ist. Ebenfalls mitbeteiligt an Tageslängenvariationen sind Änderungen ozeanischer Strömungen wie z.B. das Phänomen El Niño im südlichen Pazifik.

Figur 7 zeigt ein Trend zu kürzer werdenden Tagen. Diese dem generellen Trend entgegenlaufende Tendenz ist verursacht durch eine Variation der Tageslänge mit einer Periode in der Grössenordnung von wenigen Jahrzehnten, deren Ursache die (hauptsächlich magnetische) Wechselwirkungen zwischen dem Erdmantel und dem flüssigen Erdkern ist. Durch Flutreibung verlangsamt sich die Erdrotation sekular, was im Mittel zu einer Verlängerung der Tageslänge führt. Durch die Reibung wird Rotationsenergie dissipiert. Dabei übernimmt die Mondbahn den Drehimpuls, welcher dadurch der Erde verloren geht, was zu einer mittleren Vergrösserung des Abstandes zum Mond von 3.8 cm pro Jahr führt. Dieser Wert wurde bestätigt durch Laser-Distanzmessungen zum Mond. Der Effekt hat eine Zunahme der Tageslänge um 2.3 ms pro Jahrhundert zur Folge.

Eine sekulare Abnahme der Abplattung der Erde wirkt dem jedoch entgegen: Am Ende der letzten Eiszeit vor ca. 10000 Jahren sind im Norden gewaltige Eismassen verlorengegangen. Infolge des Wegfalls dieser Eislast hebt sich die Erdkruste in Skandinavien und Kanada noch heute um etwa 1 cm pro Jahr. Die sich dadurch effektiv verringende Erdabplattung bewirkt, dass die tatsächliche Zunahme der Tageslänge lediglich 1.7 ms pro Jahrhundert beträgt. Diese kleine Zunahme der Tageslängen summiert sich. Der Tag hatte eine Länge von genau 24 Stunden um das Jahr 1820. Seit diesem Datum hat sich die Verlängerung der Tage auf rund 85 Sekunden aufaddiert! Kompensiert wird dieser «Rotationsrückstand» der Erde gegenüber der Atomzeit mit dem mehr oder weniger regelmässigen Einschieben von Schaltsekunden am 31. Dezember oder 31. Juni. Seit der Einführung der Schaltsekunden-

regelung im Jahre 1972 wurden bis heute 22 Schaltsekunden eingeschoben. Der IERS entscheidet aufgrund von Beobachtungen durch die raumgestützten geodätischen Techniken, wann eine Schaltsekunde nötig ist.

### Neueste Entwicklungen

In diesem Artikel wurden einige von GPS-Messungen stammenden Resultate im Bereich Geodäsie/Geodynamik vorgestellt. Mit gleichem Recht hätten Resultate von SLR oder VLBI verwendet werden können. Die drei raumgestützten geodätischen Techniken ergänzen und kontrollieren sich gegenseitig sehr gut. GPS kann auf ein dichtes globales Messnetz zurückgreifen, von welchem ununterbrochene und zeitlich hochaufgelöste Messreihen geliefert werden; SLR weist eine geringe Empfindlichkeit auf systematische Fehler auf und profitiert von einer sehr guten Modellierbarkeit der Bahnen geodätischer Satelliten; VLBI schliesslich liefert den direkten Bezug zum Inertialsystem. Bestrebungen sind im Gange, die raumgestützten Messverfahren auf mathematisch korrekte Weise zu kombinieren, um so das Optimum für das Studium unseres Planeten Erde zu erreichen.

Mit neuen Satellitenmissionen, die bereits unterwegs oder geplant sind, soll das Gravitationsfeld mit bisher ungekannter räumlicher Auflösung vermessen werden. Erwähnt seien die Satelliten CHAMP (2000), GRACE (2001), GOCE (geplant für 2006), welche neuartige Instrumente wie Accelerometer oder Gradiometer sowie GPS-Empfänger mitführen. Höchste Ansprüche werden bei solchen Missionen selbstredend an die präzise Bahnbestimmung mit GPS gestellt.

Ein hochaufgelöstes genaues Modell für das Gravitationsfeld sowie dessen zeitliche Variationen ist unerlässlich für eine Vielzahl von wissenschaftlichen Anwendungen, von der Geophysik bis zur Ozeanographie. Kombination der Messungen der geodätischen Raumverfahren, der Resultate der Schwerfeld-Satellitenmissionen, von Schweremessungen am Boden, Messungen der Höhe des Meeresspiegels von Satelliten aus mit Radar (Altimetrie) und vieler weiterer geodätischer und geophysikalischer Messresultate tragen dazu bei, ein konsistentes Bild zu erhalten über die Abläufe in der Erde, an deren Oberfläche, in den Ozeanen und in der Atmosphäre. Dabei werden Satelliten auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

DR. URS HUGENTOBLER

Astronomisches Institut, Universität Bern

Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern

E-mail: urs.hugentobler@aiub.unibe.ch