

Das Global Positioning System GPS : Navstar - ein Navigationssystem für zivile und militärische Nutzung

Autor(en): **Geiger, A. / Schmidt, M.J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK =
Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **90 (1992)**

Heft 7

PDF erstellt am: **18.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-234852>

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.

Das Global Positioning System GPS

Navstar – ein Navigationssystem für zivile und militärische Nutzung

A. Geiger, M. J. Schmidt

Seit einigen Jahren ist ein weltumspannendes satellitengestütztes Navigationssystem im Aufbau, das tiefgreifende Auswirkungen auf den öffentlichen und privaten Verkehr sowie auf weite Bereiche der Wirtschaft haben wird, ganz zu schweigen von wissenschaftlichen und militärischen Anwendungen. Es wurde 1974 vom amerikanischen DOD (Department of Defence), dem Verteidigungsministerium, konzipiert und Navstar-GPS benannt (Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System). GPS soll beliebig vielen Nutzern zu jeder Zeit und an jedem Ort auf der Erde in der höchsten Genauigkeitsstufe eine absolute Positionsbestimmung auf 10 Meter und eine Geschwindigkeitsmessung auf 0.1 m/sek genau in Echtzeit ermöglichen (militärische Anwendung). Auch für zivile Nutzer ist das System mit einer etwa 5–10mal schlechteren Auflösung (50–100 Meter genau) einsetzbar. Ausgefeilte Beobachtungs- und Berechnungsmethoden lassen vermessungstechnische Anwendungen zu, wo wenige mm- oder cm-Genauigkeit gefordert wird. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen Tendenzen, dass diese hohen Genauigkeiten auch in Echtzeit erreicht werden können. Allerdings nur bezüglich einer Referenzmessstation. Der Endausbau des GPS-Systems ist für 1993 geplant, das heisst, dann sind alle 21 notwendigen Satelliten auf ihrer Erdumlaufbahn.

Depuis plusieurs années, un système de navigation fonctionnant au moyen de satellites gravitant autour de la terre est mis en place. Ce système aura d'importants effets sur les transports publics et privés ainsi que dans de multiples domaines de l'économie, sans parler des applications scientifiques et militaires. Conçu en 1974 par le DOD (Department of Defense), le Ministère américain de la défense, ce système a été dénommé NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System). Le GPS doit permettre à n'importe quel utilisateur de déterminer avec la plus grande précision une position absolue à dix mètres près ainsi qu'une mesure de vitesse à 0,1 m/sec près en valeur de temps réel, cela en tous temps et lieux sur terre (application militaire). Pour les civils intéressés, le système est également utilisable avec une résolution cinq à dix fois moindre (50 à 100 mètres près). Des méthodes affinées d'observation et de calcul permettent aussi des applications dans le domaine des mensurations, où les exigences de précision se situent au mm ou au cm près. Les résultats des recherches actuelles indiquent des tendances en vertu desquelles de telles précisions peuvent également être atteintes en valeur de temps réel; cela toutefois uniquement par rapport à une station de mesure de référence. L'achèvement de la mise en place du système GPS est prévu pour 1993, ce qui signifie que tous les vingt et un satellites requis se trouveront alors sur orbite.

Einführung

Der Beginn eines satellitengestützten Navigations-Systems geht auf das Jahr 1960 zurück, als die USA den Satelliten Transit 1B erfolgreich starteten. Während drei Monaten operierte der Satellit im Dienste der Marine und konnte damals die Position von Unterseebooten auf 150 Meter genau lokalisieren. Ermutigt durch diesen ersten Erfolg wurden laufend weitere Transit-Satelliten in Kreisbahnen um die Erde in 805 Kilometern Höhe gestartet. Bis 1968 wa-

ren es insgesamt 23 in drei verschiedenen Serien. Die Operationsdauer dieser Transit-Satelliten betrug rund fünf Jahre. Dieses sogenannte Transit-System besteht aus sechs Satelliten, die in polaren Umlaufbahnen die Erde umkreisen. Nach 1968 wurde das Transit-System mit verbesserten Satelliten unter der Bezeichnung NNSS (Navy Navigation Satellite System) ausgebaut.

Mit Hilfe dieser Satelliten ist es möglich die Position von Schiffen bei jeder Witterung und Tageszeit auf 100 Meter genau zu lokalisieren. Die letzten Transit Satelliten wurden 1988–90 mit Scout-Trägerraketen von der Vandenberg Air Force Base VAFB gestartet. Das Transitsystem wird nach ei-

Transitbahnen

Die Bahnen sind nahezu kreisförmig;
typischerweise:
Halbachse $a = 7454 \text{ km}$
Höhe (an Äquator)
 $h = a - \text{Radius-Erde} \approx a - 6378 \text{ km}$
 $\approx 1076 \text{ km}$

Exzentrizität $e \approx 0,002$

$= >$ Apogäum: $ra \approx a + 15 \text{ km}$
Perigäum: $rp \approx a - 15 \text{ km}$

Die Differenz zwischen kleiner und grosser Halbachse (und a) wird ca.
 $a \cdot \frac{1}{2} e^2 \approx a \cdot 2 \cdot 10^{-6} \approx 15 \text{ m}$

ner zwei- bis dreijährigen operationellen Phase des GPS nicht mehr gewartet werden.

Viele Schiffe und Yachten sind heute mit einem Transit-Empfänger ausgerüstet. Die kleine Anzahl von 6 Satelliten und deren relativ niederen Umlaufbahnen, die entsprechend starken Störungen unterliegen, insbesondere drehen sich die Bahnebenen zwischen 2° bis 25° pro Jahr, führen dazu, dass bis zu zwei Stunden verstreichen können bis ein Transitsatellit auftaucht und der Nutzer seine Position bestimmen kann. Zudem kann das Transit-System zur Positionierung schnell bewegter Fahrzeuge nicht eingesetzt werden. Diese Faktoren haben die USA bewogen, ein Nachfolgesystem aufzubauen. Es nennt sich Navstar-GPS und wurde 1974 vom amerikanischen Verteidigungsministerium ins Leben gerufen. Der primäre Zweck des GPS-Systems ist die Navigation militärischer Fahrzeuge zu Lande, zu Wasser und in der Luft. Ausserdem dient es bei der Zielführung von Waffensystemen. Jeder Angehörige der US-Streitkräfte soll an jedem beliebigen Punkt der Erde eine absolute Positionsbestimmung auf 10 Meter und eine Geschwindigkeitsmessung auf 0,1 m/s genau in Echtzeit vornehmen können. Diese Genauigkeit ist aber nicht für jedermann erreichbar, da die nötigen Informationen verschlüsselt sind. Zivile Nutzer des Systems können aber zur Zeit mit ihren Empfängern eine Positionsgenauigkeit von besser als 100 Meter erreichen. Die jahrelangen Beobachtungen der Transitsatelliten (und anderer geodätischen) Satelliten durch zahlreiche feste Stationen haben zu genauen Koordinaten ausgewählter Stationen und zu einer vertieften Kenntnis der Struktur des komplizierten Schwerfeldes der Erde geführt. Daraus wurde ein geodätisches Weltsystem (WGS 84) abgeleitet, das als geometrisches Referenzsystem des neuen GPS dient. Ende 1993 sollen endlich alle notwendigen 21 (18 plus 3 Reserve) operationellen Satelliten im Erdbit sein. Das GPS-System wird damit voll

Ergänzte Fassung aus «Schweizer Ingenieur und Architekt» (SI + A) 23/1992.

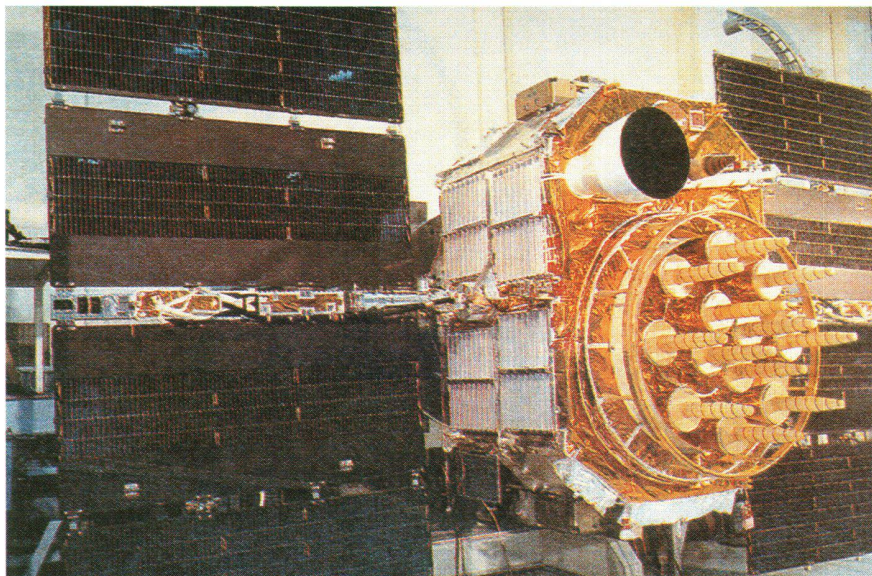


Abb. 1: Ein Satellit Navstar Block II bei der Endmontage beim Hersteller Rockwell International. (Bild: Rockwell Int. / Archiv Schmidt).

operationell sein. Für 1994–1995 ist sogar ein weiterer Ausbau auf 24 Satelliten geplant (Block 2R).

Das Raumsegment

Zum Raumsegment gehören der Teilbereich Satelliten und die Konstellation der Satelliten im Weltraum. Das Satellitensystem umfasst bis heute zwei Generationen von Satelliten, genannt Block I und Block II. Die Satelliten des Block I waren Testsatelliten, diejenigen des Block II sind operationelle Satelliten. Ab 1995 ist dann noch eine Block 2R Satelliten-Serie geplant, damit soll das System noch präziser werden. Die Satelliten der Block I Serie wurden zwischen 1978 und 1985 gestartet. Von den 10 in diesem Zeitraum in Umlauf gebrachten (Bem.: ein Fehlstart) Satelliten sind zur Zeit noch fünf einsatzfähig, obwohl ihre auf fünf Jahre ausgelegte Operationszeit bereits deutlich überschritten ist. Navstar 3, der dienstälteste GPS-Satellit, wurde im Oktober 1978 gestartet und ist heute noch aktiv.

Der Satellit

Zur Leistungsbeurteilung des GPS-Systems wurden die Satelliten des Block I entwickelt. Diese Entwicklungssatelliten sind rund ein Drittel kleiner als die operationellen Block II Satelliten. Die Startmasse betrug (inklusive Apogäumsmotor) 770 Kilogramm. Die Masse in der rund 20 000 Kilometer hohen Erdumlaufbahn mit 63° Bahnneigung lag bei noch 433 Kilogramm. Zwei Solarzellenpaddel versorgen die Satellitensysteme mit 400 Watt an elektrischer Energie. Für die Lagestabilisierung verfügen die Satelliten über Lagekontrolltriebwerke, die mit Hydrazin gespiesen werden. Um die Zeit zu überbrücken, in welcher der Satellit sich im Erd-

schatten befindet verfügt er über Nickel-Cadmium Batterien. Ab 1989 sind die größeren Block II Navstar Satelliten gestartet worden (Abb. 1). Bis zum Ende dieses Jahres sollten sich 18 davon im Erdorbit befinden. Die Block II Satelliten wurden auf Grund der Erfahrungen mit der Testserie Block I entwickelt. Sie haben eine Startmasse von 1715 Kilogramm. In der Umlaufbahn weisen sie noch eine Masse von 840 Kilogramm auf. Die Satellitenstruktur ist kubusförmig und hat ein Grundmass von 2×1 Meter und ist 1,20 Meter hoch. Darauf ist der Antennenblock für die Navigation (Wendelantennen) mit einem Meter Höhe montiert. Zwei Solarzellengeneratoren mit je einer Spannweite von 5 Metern und einer Breite von 1,7 Metern mit insgesamt 8 m^2 Solarzellenfläche liefern nach sieben Jahren noch 700 Watt an elektrischer

energie. Zwei Hydrazin-Treibstoff-tanks speisen ein Lagekontrolldüsen-system mit insgesamt 22 kleinen Triebwerken, die stirnseitig in zwei Blöcken an der Satellitengrundstruktur angebracht sind. Um die Stromversorgung während der Dunkelflugphase (Erdschatten) zu gewährleisten, befinden sich drei Ni/Ca-Batterien an Bord. Die Satelliten sind ausserdem mit einem trichterförmigen Detektor ausgerüstet um Atombombenexplosionen zu registrieren. Eine entfaltbare über zwei Meter lange Rundstrahlantenne im S-Band-Bereich dient für die Kommunikation mit dem Satelliten von der Bodenstation aus. Die Block II Serie ist auf eine aktive Operationsdauer von 7,5 Jahren ausgelegt. Die vorhandene Bordenergie (Solarstrom) und Treibstoffreserve für das Lagerregulierungssystem lassen einen 10jährigen Betrieb ohne weiteres zu.

Start mit Delta II

Bei der Festlegung des Navstar Block II Konzepts wurde davon ausgegangen, dass die Satelliten mit dem STS (Space Transportation System) also dem Space Shuttle auf ihre Erdumlaufbahnen transportiert werden sollten. Die Challenger-Katastrophe im Jahr 1986 machte diesen Plan zunichte. Die Verantwortlichen des Verteidigungsministeriums mussten sich nach anderen Trägersystemen umsehen. Die Wahl fiel auf die neu modifizierte und produzierte Rakete Delta-II. Sie gehört der Kategorie von Raketen mittlerer Leistung den sogenannten MLV (Medium Launch Vehicle) an (Abb. 2). Im Jahre 1989 konnte der erste Start des Navstar-13 (der erste der Block II Serie) erfolgreich durchgeführt werden.

(Bemerkung: Navstar-13 ist wohl der erste in der Numerierung der Block II. Gestartet



Abb. 2: Mit Trägerraketen des Typs Delta II werden die Navstar-Satelliten auf ihre kreisförmigen Erdumlaufbahnen transportiert. (Bild: NASA / Archiv Schmidt.)

wurde er als 2. [6/10/89] nach Navstar-14 [2/14/89].)

Die Satelliten der Block II Serie werden auf kreisförmigen Erdumlaufbahnen mit einem Bahnradius von 26 609 Kilometern (Bahnhöhe 20 240 Kilometer) positioniert. Die Bahnneigung beträgt 55° . Die Satelliten werden in sechs Bahnen zu je vier Satelliten transportiert.

Die erste Konstellation künstlicher Sterne

Die gewählte Bahnkonstellation weist einige Besonderheiten auf. Die Umlaufperiode beträgt 12 Stunden. In jeder Bahnebene bilden die Satelliten ein gleichseitiges Dreieck (Winkelabstand 120°). Von Bahn zu Bahn ist dieses Dreieck um 40° versetzt.

Die Abstände der sechs Bahnknoten betragen je 60° . Die gewählte Konstellation von 21 operationellen plus 3 aktiven Reserve-Satelliten auf sechs Bahnen führt dazu, dass immer mindestens vier Satelliten sich über dem Radiohorizont befinden (Abb. 3). Meistens sind es aber sogar fünf oder sechs. Die Navstar-GPS-Satelliten sind mit hochgenauen Cäsium-Atomuhren, sogenannten Oszillatoren ausgestattet. Die Genauigkeit dieser Atomuhren ist die Schlüsselstelle für die Effizienz des Systems. Die Block II Satelliten haben Atomuhren welche in 300 000 (!) Jahren nur um eine Sekunde fehlerhaft sind. Die Block I Serie verfügt z.T. über Rubidium-Atomuhren, die einen Fehler von einer Sekunde in 65 000 Jahren aufweisen. Der Satellitenuhr kommt zweierlei Bedeutung zu: Zum einen muss die absolute Zeit bekannt sein, damit die Lagekoordinaten des Satelliten und die momentane Drehposition der Erde errechnet werden können. Zum anderen dient der Oszillator als Generator von zeitlich hochpräzisen elektromagnetischen Funk-Signalen. Der Empfänger am Boden kann auf Grund seiner eigenen präzisen Uhr die Ankunftszeit oder entsprechend die Laufzeit der Signale messen, etwa vergleichbar mit einer Stoppuhr. Daraus ergibt sich sofort die Distanz zum Satelliten. Der Beobachter muss sich also auf einer im Satelliten zentrierten Kugel befinden. Der Radius entspricht dabei genau dem gemessenen Abstand Satellit-Empfänger. Hätte man gleichzeitig Distanzen zu drei verschiedenen Satelliten gemessen, so müsste sich der Beobachter genau im Schnittpunkt der drei entsprechenden Kugeln befinden. Leider kommt zu diesem einfachen Lösungsansatz eine Komplikation hinzu, indem der Startzeitpunkt des Signals durch die Satellitenuhr, die Ankunftszeit jedoch durch die Empfängeruhr gegeben wird. Man muss also damit rechnen, dass die Uhren zwar genau aber nicht gleich eingestellt, synchronisiert sind. Damit wird aber die Distanzmessung verfälscht. Man spricht daher auch von Pseudodistanzmessung.

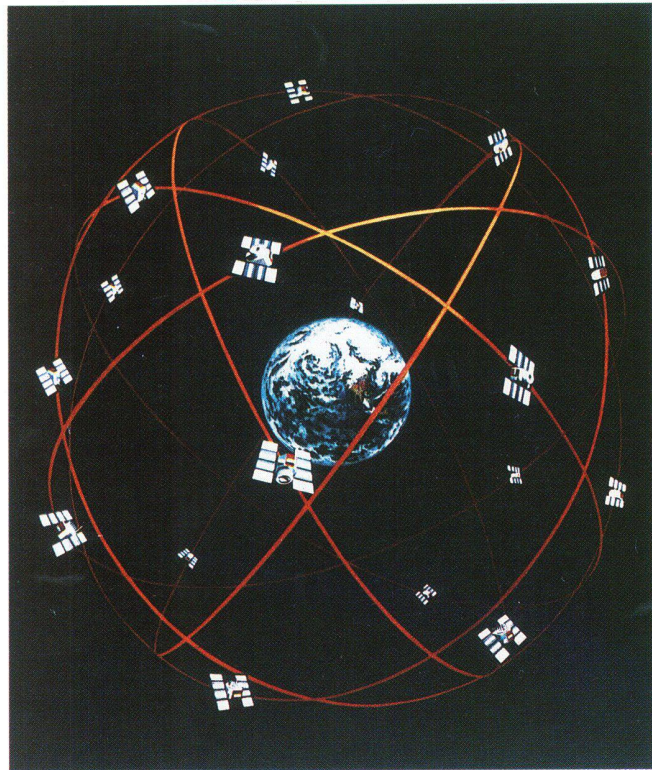


Abb. 3: Auf sechs verschiedenen Bahnen umkreisen die 18 Navstar-Satelliten in 20 000 Kilometern Distanz die Erde, so dass sich immer mindestens vier Satelliten über dem Horizont befinden. (Foto: Rockwell Int. / Archiv Schmidt.)

Um diesen Synchronisationsfehler zu eliminieren, braucht man eine zusätzliche Messung zu einem vierten Satelliten. Jetzt wird klar, warum das Navstar-GPS-Block II System so konzipiert wurde, dass im Endausbau mindestens vier Bezugspunkte (Satelliten) im Sichtbereich des Nutzers zu jeder Zeit vorhanden sind. Das GPS-Navigationssystem ist so genau, dass sogar die Effekte der Relativitätstheorie und die Störungen durch die Ionosphäre merkbar werden. Um relativistische Effekte zu berücksichtigen, werden die Atomuhren an Bord der Satelliten entsprechend eingestellt. Die Oszillatoren der Satelliten haben eine Frequenzgenauigkeit von 1×10 hoch 13. Die Systemzeit wird von einem Wasserstoff-Maser in der Masterkontrollstation (Colorado Springs) repräsentiert und wurde so festgelegt, dass sie am 5. Januar 1980 gleich der koordinierten Weltzeit (UTC) entsprach. Da UTC der sich verlangsamen der Erddrehung in Sekundenschritten nachgeführt wird, die GPS-Zeit sich aber auf ein Atomnormal bezieht, laufen diese beiden Zeitskalen auseinander. Zur Zeit ist die GPS-Zeit der UTC um etwa 7 Sec. voraus.

Da die Satellitenuhren infolge relativistischer Effekte (Potentialdifferenz und Relativbewegung gegen die Bodenuhr) um durchschnittlich 38500 Nanosekunden pro Tag schneller laufen, muss die Nominalfrequenz des Oszillators vor dem Start ent-

sprechend verringert werden. Die ionosphärischen Effekte können durch Messen von zwei parallelen Satelliten-Signalen eliminiert werden.

Block 2R in Entwicklung

Wie erwähnt besteht die Block II Serie aus 18 operationellen und 3 Reservesatelliten in der Erdumlaufbahn. Seit 1987 wurde aber bereits die Entwicklung der Block 2R Satelliten in Angriff genommen. Das Block 2R System soll den operationellen Betrieb voraussichtlich 1995 aufnehmen. Gegenüber dem Block II System soll das Nachfolgekonzept als wichtigste Neuerung aufweisen:

Die Satelliten werden gegenseitig ihre Distanz mit hoher Präzision messen, was eine noch genauere Bahnbestimmung erlauben wird. Ausserdem sollen die Satelliten ihre Ephemeriden selbst an Bord berechnen und dadurch vom Kontrollsegment unabhängig werden. Das Block 2R System besteht aus 21 operationellen plus 3 Reservesatelliten.

Das Satellitensignal

Aus einer Grundfrequenz von 10.23 MHz werden durch Multiplikation mit den Faktoren 154 beziehungsweise 120 zwei Trägerfrequenzen L1 und L2 abgeleitet:

L1 = 1575.42 MHz (19.05 cm)

L2 = 1227.60 MHz (24.45 cm)

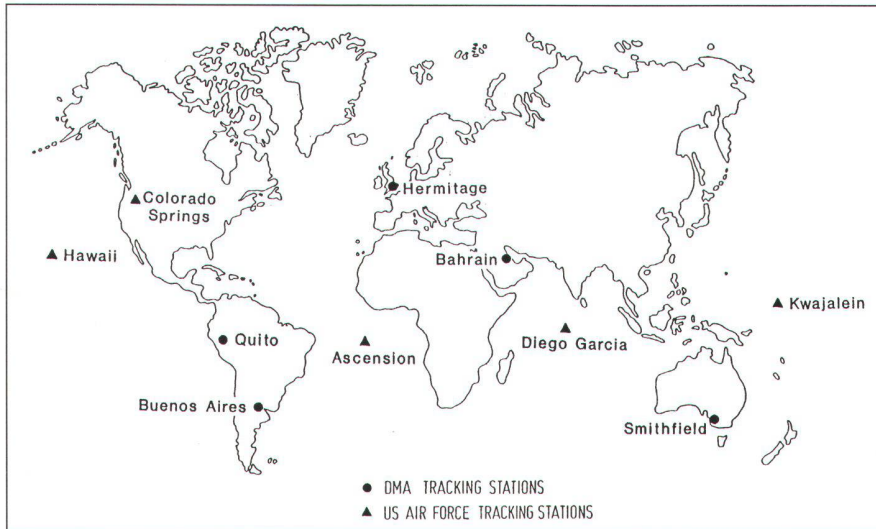


Abb. 4: Kontrollsegment des GPS. Die Luftwaffe der USA betreibt das eigentliche, operationelle Kontrollnetz. Die 5 Stationen sind um den ganzen Erdball verteilt. Die Defense Mapping Agency (DMA) der USA unterhält zusätzlich 5 Stationen. (Aus: Müller, A., Mil. Geo., BRD.)

Jeder Satellit sendet beide Trägerwellen aus, denen Navigationssignale (sogenannte Codes) beziehungsweise Navigations- und Systemdaten (Message) überlagert sind. Die Codes sind den Trägerwellen als sogenannte Pseudo Random Noise Sequenzen aufmoduliert. Das L1-Signal enthält sowohl den genauen, aber geheimen P-Code (Precise-Code) und den weniger genauen C/A-Code (Coarse/Aquisition-Code). Das L2-Signal enthält nur den P-Code. Diese zweite Frequenz wäre an sich nicht notwendig, sie ermöglicht es aber, den Einfluss der Ionosphäre auf die Wellenausbreitung zu erfassen. Der C/A-Code hat die Frequenz von 1.023 MHz, der P-Code von 10.23 MHz. Es stehen also Wellen mit vier verschiedenen Wellenlängen zur Verfügung:

C/A-Code rund 300 m
P-Code rund 30 m
L2-Träger rund 24 cm
L1-Träger rund 19 cm

Diese Wellenlängen spielen eine entscheidende Rolle bei der einzelnen Distanzbestimmung zum Satelliten, indem die Messauflösung, die sich dann in der Positionsgenauigkeit niederschlägt, typischerweise 1% der Wellenlänge beträgt. Demnach variiert je nach verwendetem Signal die Einzelmessgenauigkeit zwischen 3 m und 2 mm.

Im zukünftigen operationellen Betrieb werden nur die autorisierten Nutzer den genauen geheimen P-Code benutzen können, alle anderen Interessierten am GPS-Positionierungssystem müssen sich mit dem weniger genauen Code zufrieden geben. Uneingeladen hatten nämlich auch die ehemalige Sowjetunion die Möglichkeit vom Navstar-GPS Gebrauch zu machen,

obwohl sie in den vergangenen Jahren an einem ähnlichen Positionierungssystem arbeiteten, welches sich Glonass nennt (Global Navigation Satellite System). Die russischen Satelliten, von denen jeweils drei gleichzeitig mit Protonraketen gestartet werden, befinden sich 19 300 km über der Erde auf Bahnen mit einer Neigung von 64.8°. Das Glonass System soll vor allem der Marine sowie für die Flugbahnvermessung der russischen Interkontinentalraketen dienen.

Das Bodensegment

Die Satelliten werden auf ihren Erdumlaufbahnen von einem sehr umfangreichen Bodenstationsnetz, dem Kontrollsegment auf ihre Funktionstüchtigkeit, Uhrgenauigkeit und Bahnparameter hin dauernd überwacht. Das von der US Air Force betriebene Kontrollsegment umfasst zur Zeit fünf Bodenstationen. Die Hauptstation oder Master Station befindet sich in Colorado Springs. Damit die Satellitensignale ununterbrochen empfangen werden können, sind noch vier weitere Stationen in Betrieb, nämlich Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein Atoll und Hawaii.

Die Stationen übermitteln die empfangenen Satellitensignale der Master Station. Diese errechnet die Bahnparameter, die Satellitenzeit und die Parameter des Ionosphärenmodells (Funksignale beim Durchdringen der Ionosphäre). Die Ephemeriden werden für die nächsten Stunden präzisiert und alle 8 Stunden von drei «upload stations», das sind Ascension Island, Diego Garcia und Kwajalein in die Bordcomputer der Satelliten eingespeist (Abb. 4). Nicht erfasste periodische relativistische Effekte und individuelle Uhrfehler bewirken eine Uhrendrift. Falls notwendig können und werden die Satellitenuhren auf die Masteruhr synchronisiert. Für zivile und wissenschaftliche Zwecke beteiligen sich ausserdem noch 20 weitere Bodenstationen an der Bahnbeobachtung des Navstar-GPS-Systems. Davon befinden sich vier in Europa. Diese Bodensta-

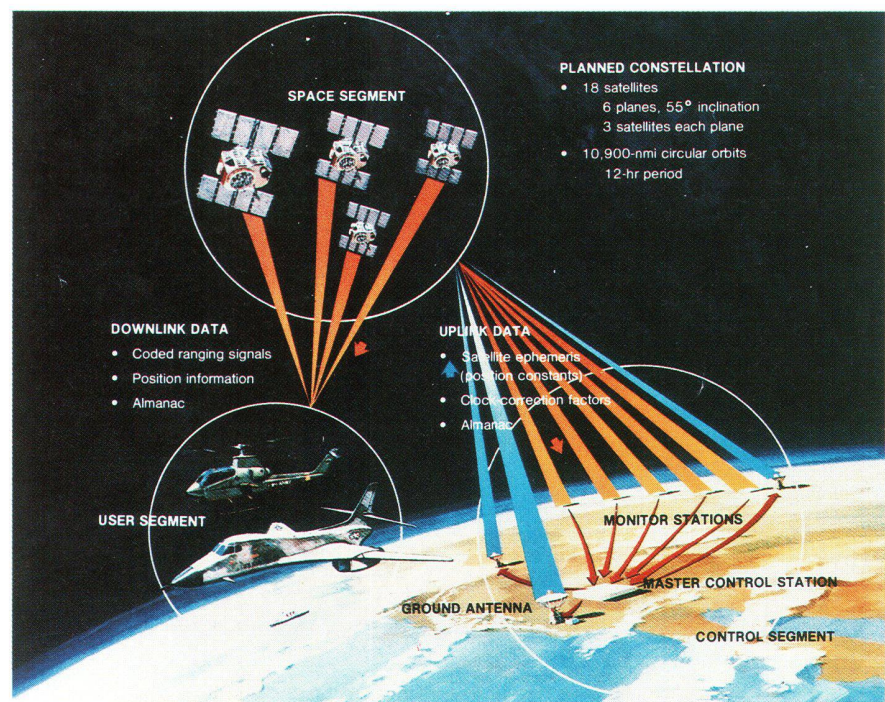


Abb. 5.: Die drei Elemente des Navstar-GPS Systems: Das Raumsegment mit den 18 Satelliten, das Bodensegment mit den Bodenstationen zur Satellitenkontrolle und das Nutzersegment, wie Flugzeuge, Schiffe usw. (Foto: Rockwell Int. / Archiv Schmidt.)

tionen haben sich dazu zum sogenannten Cignet (Cooperative International GPS Network) zusammengeschlossen.

Das Nutzersegment

Das Nutzersegment besteht aus Geräten zum Empfang der Satellitendaten, die in unterschiedlichen Grössen und Preisklassen erhältlich sind. Das Endziel des DOD ist, dass jeder Angehörige der US-Streitkräfte zu Land, zu Wasser oder in der Luft mit einem kleinen Empfänger von der Grösse einer Zigarettenschachtel jederzeit und rund um den Erdball seinen Standort auf wenige Meter genau eruieren kann (Abb. 6). Das GPS dient nicht nur militärischen Zwecken, sondern wird auch für die Navigation von Schiffen und Flugzeugen sowie für geodätische (Studium der Erde als physikalischer Körper) und vermessungstechnische Messungen eingesetzt. In den anschliessenden Kapiteln werden einige typische zivile Anwendungen von GPS beschrieben.

Potentiale jenseits der ursprünglichen GPS-Idee

In den vorhergehenden Kapiteln wurde die ursprüngliche Idee der Positionierung mit GPS beschrieben. Die Konzeption geht dort von gleichzeitigen Messungen der Pseudo-Distanzen zu mindestens vier Satelliten aus. Diese ursprüngliche Idee ist verwirklicht und wird operationell in der Navigation mit tiefem Genauigkeitsanspruch eingesetzt. Um jedoch den höheren Genauigkeitsansprüchen gerecht zu werden, wurden sowohl die Messmethoden wie auch die Auswertverfahren ganz wesentlich verfeinert. Wie bereits angedeutet, sendet jeder GPS-Satellit zwei Trägerfrequenzen und zwei dem Träger aufmodulierte Codes. Es geht nun darum, eine möglichst genaue Distanzmessung zu den Satelliten ausführen zu können. Offensichtlich wird der öffentlich zugängliche C/A-Code die schlechteste Auflösung zulassen. Der in Zukunft nur ausgewählten Nutzern bekannt gemachte P-Code liefert dagegen eine etwa 10-mal bessere Auflösung. Eine entscheidende Genauigkeitssteigerung erreicht man nun durch einen sogenannten Phasenvergleich der Trägerwelle mit einer Referenzfrequenz im Empfänger. Die Messung des L2-Trägers ermöglicht gegenüber der C/A-Codemessung eine 1200-mal bessere Auflösung. Der L1-Träger lässt gar einen Faktor von 1500 zu. Erreicht man mit den einfachen C/A-Codemessungen eine Positionsgenauigkeit von 100 Metern, so würde eine Positionierung mit Phasenmessungen eine formale Genauigkeit von wenigen Zentimetern ergeben. Die Frage stellt sich nun, warum man zur einfachen Navigation nicht direkt die Phasenmessungen ver-



Abb. 6: Beim Nutzersegment werden mittlerweile kleinste Empfänger zur Positionsbestimmung eingesetzt. Im Bild erkennt man einen Forscher in der Arktis bei der Positionsbestimmung mit einem handlichen Empfänger. (Foto: Trimble Navigation / Archiv Schmidt.)

wendet. Das Problem liegt tatsächlich bei der Messmethode, indem der Code eine absolute Distanzangabe liefert. Die Phasenmessung gibt aber nur an, wo man sich innerhalb einer Wellenlänge befindet. Dabei bleibt unbekannt, wie viele ganze Wellenlängen sich zwischen Empfänger und Satellit befinden. D.h. die Distanz ist zwar mit sehr hoher Auflösung gemessen aber trotzdem ist sie nicht bekannt. Die unbekannte Zahl ganzer Wellenlängen, die sogenannte Mehrdeutigkeit, muss noch in der Auswertung bestimmt werden. Ist diese Zahl einmal festgelegt, so kann die Distanz tatsächlich mit mm-Auflösung angegeben werden. Zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten muss aber der Empfänger während mehreren Messungen an einem festen Ort verbleiben. Je mehr Satelliten gleichzeitig empfangen werden, desto kürzer braucht diese Zeitspanne der stationären Messung zu sein. Die navigatorische Anwendung basiert jedoch darauf, dass der Empfänger nicht fest bleibt, sei es auch nur für einen kurzen Augenblick. Daraus ist zu folgern, dass die Phasenmessung nicht im Sinn der Codemessungen für die Navigation verwendet werden können. Allerdings sind Algorithmen in Entwicklung und in der Testphase, die die hohe Auflösung der Phasenmessung auch im kinematischen Modus, für bewegte Empfänger also, nutzbar machen. Selbst für Flugzeugpositionierungen können dabei Genauigkeiten unter 10 cm erreicht werden.

Die eben erwähnten hohen Genauigkeiten sind als eine Art Auflösung oder innere Genauigkeit zu verstehen. Will man diese hohe Präzision auch tatsächlich realisiert haben, so ist dafür Sorge zu tragen, dass systematische Fehlereinflüsse eliminiert oder mindestens reduziert werden. Dies

wird durch das Verfahren der Relativ- oder differentiellen Messung erreicht. Dazu braucht man jedoch mindestens zwei Empfänger. Der eine wird auf einem geodätisch bekannten Punkt fest installiert. Die Auswertung der Daten ergibt dann nicht absolute Koordinaten, sondern Relativkoordinaten bezüglich dieses bekannten Punktes. Das folgende Beispiel mag dies illustrieren. Der Landeanflug eines Flugzeuges kann durchaus mit GPS kontrolliert werden. Die absolute Position kann jedoch auf Grund fehlerbehafteter Satellitenbahnen, unzureichender atmosphärischer Korrekturen usw. wohl mit hoher Auflösung jedoch um etliche Meter falsch berechnet werden. Dadurch, dass ein zweiter Empfänger in der Nähe des Flugplatzes steht und permanent sogenannten Korrekturwerte dem Flugzeug übermittelt, kann eine hohe Genauigkeit der Relativposition garantiert werden. Die Relativposition bezieht sich dann auf den Referenzempfänger am Boden, sprich Flugplatz. Heutige Genauigkeiten erlauben Blindlandungen nur gestützt auf GPS. Mehr zu den Anwendungen von GPS erfährt der Leser in den nachfolgenden Kapiteln.

Infolge des Ionosphäreneinflusses auf die GPS-Messungen können sich Fehler, die wohl durch Zweifrequenz-Messungen weitgehend eliminiert werden, einstellen. Die verbleibenden Restfehler sind umso grösser je aktiver die Ionosphäre sich verhält. Nun wird aber gerade die Ionosphärenaktivität durch die Sonneneinstrahlung verstärkt. Aus diesem Grunde werden zur Gewinnung optimalster GPS-Messungen Nachtstunden vorgezogen, vorausgesetzt die Satellitenkonstellation zeigt eine genügend gute Geometrie.

Partie rédactionnelle

Aus all den Bemerkungen ist ersichtlich, dass GPS in allen Genauigkeitsschattierungen und entsprechenden Anwendungen eingesetzt werden kann. Die Gerätetypen sind den Bedürfnissen der Benutzer entsprechend konzipiert. Dies schlägt sich auch in der Preisskala der angebotenen Geräte nieder.

Als Zusammenfassung seien fragmentarisch die verschiedenen ungenaueren Messmodi den genaueren Verfahren gegenübergestellt:

betriebene und z.T. von der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) unterstützte Referenzstation Zimmerwald sein. Anhand der permanenten Messung und Auswertung können sowohl die GPS-Satellitenbahnen genau verfolgt als auch Unregelmässigkeiten in der Erdrotation festgestellt werden. Im kleineren schweizerischen Rahmen obliegt die Bereitstellung eines geodätischen Referenz- oder Grundnetzes dem Bundesamt für Landestopographie. Es hat sich zum Ziel gesetzt

wegungen mitberücksichtigt werden. Umgekehrt können aus GPS-Messungen die Bewegungen der einzelnen Krustenplatten gegeneinander direkt bestimmt werden. Wenn man bedenkt, dass in verschiedenen Gebieten jährliche Verschiebungsraten von etlichen Zentimetern über wenige 100 km auftreten, so ist es offensichtlich, dass in wenigen Jahren diese Bewegungen messtechnisch nachgewiesen werden können. Dabei lassen sich natürlich auch Ozeane überbrücken. Das Auseinanderdriften des Alten und des Neuen Kontinentes können also ebenso überwacht werden wie die lokalen Geländeerutschungen an einem Berghang. Die Messung plattentektonischer Bewegungen könnten Hinweise auf mögliche Erdbebenherde geben, zudem erlauben sie, gewisse Rückschlüsse auf die Antriebsmechanismen der Plattenbewegungen zu ziehen. Das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich (IGP, Professur für Höhere Geodäsie und Geodynamik, Prof. Kahle) untersucht in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geophysik der ETHZ und mit britischen und griechischen Instituten diese geodätisch/geophysikalischen Zusammenhänge unter anderem mit Hilfe von GPS im erdbebenaktiven Gebiet von Griechenland. Ein aktiver Beitrag von GPS in der Erdbebenforschung also.

ungenauer	genauer		
C/A Code L1	P Phase L1 und L2	}	gerätespezifisch
absolut bewegt Tag	differentiell stationär Nacht		
		}	verfahrenspezifisch

Die ungeauertesten Resultate wird man also mit den einfachen C/A-Code Empfängern bei absoluter Positionierung in bewegtem Zustand bei Tag erhalten. Der grösste Genauigkeitserfolg bringt die Messung der Phase. Für höchste Genauigkeiten sind also differentielle Messungen auf Fixpunkten mit 2-Frequenz-Phasempfängern nötig.

Die Vermessung und die Geodäsie orientiert sich neu

Die Anwendungen von GPS sind ungezählt. Einige Beispiele mögen die Fülle der Anwendungsmöglichkeiten andeuten, keinesfalls darf die Liste als vollständig bezeichnet werden. Es ist interessant festzustellen, dass GPS, wie der erste Buchstaben im Acronym auch andeutet, nicht ein lokales sondern vielmehr ein globales «Ereignis» darstellt. Bedingt durch den weltweiten «Überblick» der Satelliten zwingt sich internationales Zusammenarbeiten auf. So wird zur Bestimmung eines einheitlichen europäischen geodätischen Referenzsystems (EUREF) das GPS eingesetzt. Die entsprechenden Messkampagnen wurden z.T. bereits durchgeführt. Fünf dieser europäischen Fundamentalepunkte sind Teil des Schweizerischen geodätischen Referenznetzes. Um einen zukünftigen zivilen weltweiten Bahndienst aufzubauen, wird 1992 ein erster globaler Versuch gestartet, bei dem das Astronomische Institut der Universität Bern massgeblich beteiligt ist. Im Rahmen dieses International GPS Geodynamics Service (IGS) werden rund hundert weltweit verteilte Stationen GPS-Signale permanent empfangen. In der Schweiz wird dies die vom Bundesamt für Landestopographie in Zusammenarbeit mit der Universität Bern

die schweizerische Grundlagenvermessung ab 1995 voll auf das GPS vermessene Grundlagentnetz abzustützen. Dazu wurden bereits drei Viertel der 120 neuen Vermessungspunkte 0. ter Ordnung auf ca. 1 bis 2 cm mit GPS eingemessen. Dies bedeutet konkret, dass erstmals in der Vermessungsgeschichte Distanzen zwischen dem Bodensee und dem Genfersee auf wenige cm genau bekannt sind. Dieses hochpräzise Netz dient als neue Referenz für die gesamte Vermessung in der Schweiz. Durch die fünf bereits erwähnten Punkte Generoso, La Givrine, Zimmerwald, Chrischona und Pfänder ist dieses Netz mit der übergeordneten europäischen Referenz verknüpft.

Als Novum in der Geschichte der Vermessung wird es auch möglich die internationalen Höhenreferenzen mit genügender Genauigkeit und in kurzer Zeit miteinander zu vergleichen. Die sog. «Normal Nulls» sind jeweils an Normalpegel an der Küste geknüpft. Die dank GPS mögliche Vernetzung dieser Pegel liefert ein Gesamtbild der Meeresspiegelschwankung, eine, im Lichte der Atmosphärenerwärmung gesehen, umweltrelevante Messgrösse.

Wegeners Träume werden Tatsache

Für Referenznetze im regionalen aber auch im globalen Rahmen ergeben sich ganz neue Problemstellungen und Gesichtspunkte. Was sich Wegener in den Dreissiger Jahren zu zeigen erhofft hatte und damals vielerorts als Fantasterei abgetan wurde, ist heute Tatsache geworden: Die Bewegungen der Kontinente sind geodätisch messbar geworden. Bedingt durch die hohen erreichten Messgenauigkeiten müssen z.T. bei der Definition von globalen Fixstationen die Erdkrustenbe-

Auch kleinräumige Probleme werden mit globalen Methoden gelöst

Lokale Geländebewegungen, wie Hangrutschungen können nach vergleichbaren Methoden überwacht werden. Die Effizienz der GPS-Methode bei der Lösung auch kleinräumiger Vermessungsprobleme wurde durch private Büros, L + T und Hochschulinstitute verschiedentlich demonstriert. Aufgaben der Ingenieurvermessung können ebenfalls mit GPS angegangen werden. Es ergeben sich dabei sehr elegante Lösungsansätze, da bei der Satellitenvermessung die Notwendigkeit der Sichtverbindung zwischen zwei Messstationen hinfällig wird. Ein schon bald klassisches Beispiel hierfür stellt die Vermessung des Grundlagentnetzes eines Tunnelneubaues dar. Während früher die Bestimmung der Portalpunkte und die Festlegung der ersten Angriffsrichtungen der Bohrungen umfangreiche Distanz- und Winkelmessungen über das zu querende Gebiet nötig machten, kann durch die Messung mit GPS von wenigen Punkten auf jeder Portalseite die gleiche Aufgabe in kürzester Zeit gelöst werden. Auch beim Bau des Kanal-Tunnels wurde GPS zur Kontrolle der gegenseitigen Lage der beiden «Tunnelenden» eingesetzt. Kürzlich wurde der Tunnel unter der «Vue des Alpes» durchschlagen. Das entsprechende Grundlagentnetz wurde damals als Novität für die Schweiz mit GPS vermessen. Die erreichten Durchschlagsfehler

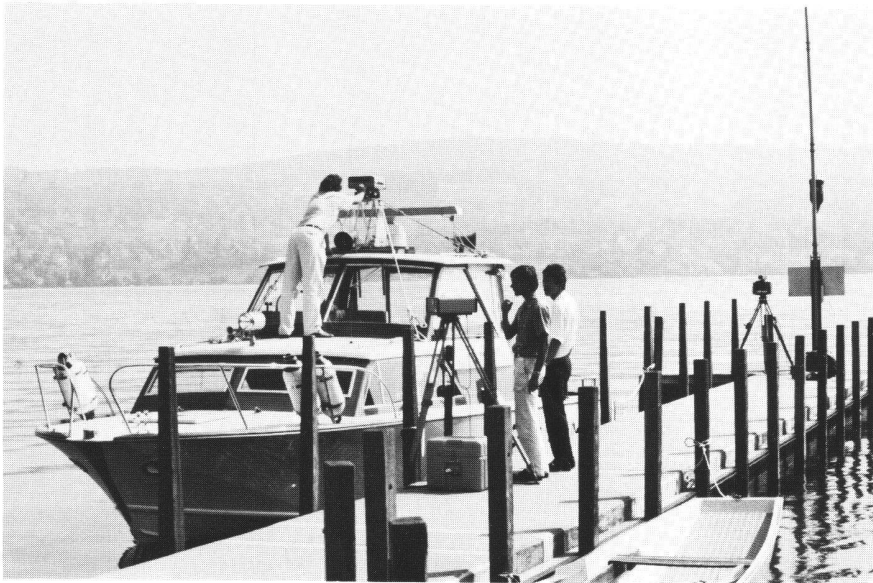


Abb. 7: Differentielles GPS. Für Testzwecke wird auf einem Schiff der Zürcher Seepolizei ein GPS-Empfänger montiert. Direkt unter dem Empfänger befindet sich der Reflektorkranz für die optische Verfolgung. Am Molenkopf ist der automatische Theodolit mit Laser-Distanzmesser erkennbar. Die fixe GPS-Referenzstation ist neben dem Schiff mit einem Stativ auf der Mole installiert. (Aus: Cocard, Geiger, 1990 / IGP-ETHZ.)

zeigen, dass GPS tatsächlich derartigen Aufgaben gewachsen ist.

Gegenwärtig werden grosse Anstrengungen in der Entwicklung von Auswertemethoden unternommen, die es erlauben, die Beobachtungsdauer drastisch zu reduzieren. Dabei haben sich unter dem Begriff «schnelle statische Beobachtung» (rapid static) verschiedene Methoden herausgebildet. Dabei hat auch die Firma Leica, Heerbrugg, in Zusammenarbeit mit dem Astronomischen Institut der Universität Bern erfolgreich an einer derartigen Methode gearbeitet. Bei genügender Anzahl Satelliten und günstiger Konstellation lassen sich kleinräumig in Minutenschnelle die Punktkoordinaten im Bereich von cm-Genauigkeit bestimmen. Dies erhöht die Konkurrenzfähigkeit von GPS im kleinräumigen Vermessungs- und Katasterwesen ganz erheblich, war doch gerade der bis anhin nötige, relativ grosse zeitliche Messaufwand ein gewichtiger Hinderungsgrund, GPS für derartige Aufgaben einzusetzen.

Dank GPS gewusst wo und wohin

Neben den eben beschriebenen statischen Anwendungen von GPS öffnet sich ein fast unübersehbares Feld von Möglichkeiten im Bereich der kinematischen Positionierung. Die ursprünglich von den GPS-Entwicklern anvisierten Ziele sind bereits heute weit übertroffen worden. Es ist keine Frage, dass das GPS oder ähnliche zivile Satellitensysteme die herkömmlichen Radionavigationssysteme ablösen wird. Technisch wäre dies bereits heute in grossem Umfang möglich, allerdings sind etwelche Probleme und Fragen bezüglich

der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit zu lösen und zu beantworten. Unklar ist, ob weltweit sich alle zivilen Nutzer auf ein unter militärischer Regie betriebenes System wie GPS stützen sollen und wollen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass Rufe nach zivilpolitischer Einflussnahme auf das GPS und Forderungen nach Reserve- oder Backup-Systemen zu vernehmen sind. Die jetzige Satellitenkonstellation lässt ohnehin noch keine optimale dreidimensionale 24-Stundennavigation zu. Nichts desto trotz sehen Fluggesellschaften wie Lufthansa für ihre neuen Flugzeuge GPS vor. Viele Privatflieger orientieren sich nach GPS und sogar die alte «Tante JU» zieht ihre Volten nicht ohne GPS. Trotzdem, und da liegen, wie erwähnt, gute Gründe vor, ist, mindestens zur Zeit, GPS nicht als Hauptnavigationshilfe für die Zivilluftfahrt zugelassen. Dies dürfte sich mit zunehmender Operationalität des Systems jedoch in den nächsten Jahren ändern. In der Schifffahrt wurde die Satellitennavigation mit dem in der Einführung beschriebenen Transit-Doppler-System schon im Lauf der Sechziger- und Siebziger-Jahre eingeführt. Entsprechend schnell findet nun auch GPS auf den Kommandobrücken und neben den Kartentischen seinen Platz. Bereits sind digitale Karten der Hochsee, ganzer Küstenregionen oder auch einzelner Häfen im Handel erhältlich. Gekoppelt mit der Navigationshilfe von GPS und einer Echtzeit-Bildschirmdarstellung der Position in der Karte findet sich der Schiffsführer auch in vertrackten Fahrwassern und verwinkelten Häfen zurecht.

Die Genauigkeit mit der die Position in Echtzeit bestimmt werden kann und die

fortschreitende Miniaturisierung der Empfänger (und der Preise) hat GPS auch den weiten Markt der Autoindustrie geöffnet. Hier liegen z.T. schon realisierte Projekte vor, die über reine Positionierung hinausgehen. Eigentliche Informationssysteme mit digitalen Karten und Zusatzdaten über z.B. Verkehrsstaus, Baustellen, Restaurants und und... könnten ein Teil eines Gesamtverkehrsleitsystems sein. GPS im Fahrzeug könnte einem dann dazu verhelphen, das nächste Restaurant möglichst schnell durch Umgehung der gemeldeten Staus zu erreichen. Im professionellen Umfeld werden bereits jetzt ähnliche Systeme angeboten, die im Verbund mit Mobilfunkanlagen als zentrale Leitwarten zur Flottenverwaltung konzipiert sind. Selbst für der Vermessung und der Ortung wenig verwandte Gebiete kann GPS eingesetzt werden. Zu nennen wäre etwa die Zeitübertragung oder Synchronisation von Uhren an von einander entfernten Standorten. Geht man wiederum von geodätisch erreichbaren höchsten Genauigkeiten aus, so könnten durchaus Synchronisationen über Entfernungen von mehr als 1000 Kilometern im Bereich von 1 nsec erreicht werden.

Mit GPS durch dichten Nebel zur Landung

Die angetönten Einsatzmöglichkeiten von GPS können keineswegs das ganze Spektrum der Anwendungen der Satellitennavigation abdecken. Zudem ist auch hier zu bemerken, dass nicht nur die Entwicklung der Geräte und der Preise den Markt für GPS beeinflussen, sondern auch die Auswertemethodiken neue Applikationen von GPS ermöglichen.

Ähnliche wie im statischen Fall wendet man auch im kinematischen Modus verfeinerte Auswerte- und Messtechniken an. Allen voran wird vermehrt das Potential der Phasenmessungen ausgeschöpft. Dabei können im Normalfall Genauigkeiten, die unter 1 m liegen erreicht werden. Bei idealen Bedingungen sind 10 cm Genauigkeiten wohl möglich, sie wurden auch schon publiziert, die 1 cm Grenze, wie sie im statischen Fall unterschritten wird, wird zwar prognostiziert, wurde aber noch nicht in allen Teilen nachgewiesen. Diese fast miraculösen Zahlen beflügeln die Phantasie der Anwendungserfinder. Etwelche Applikationen sind allerdings bereits, z.T. auch nur im Versuchsbetrieb, realisiert worden.

Denkt man etwa an Kartierungsaufgaben, wie etwa die Aufnahme von Strassenzügen, Schienennetzen oder die Seeaufnahme (Abb. 7), so kann dies durch Abfahren der entsprechenden Strecke mit GPS auf dem Fahrzeug erfolgen. Die Entstehung des Plans kann direkt am Bildschirm verfolgt werden. Versuche in dieser Richtung wurden vom IGP im Gebiet des Räfzerfeldes und auf dem Zürichsee unter-



The graph displays a cross-sectional profile of a mountain range. The horizontal axis represents distance, ranging from 340,000 to 420,000 with major ticks every 10,000 units. The vertical axis represents height, ranging from 0 to 2,750 with major ticks every 250 units. The profile begins at a distance of approximately 355,000 with a height of about 2,750. It remains relatively flat until a distance of about 360,000, after which it slopes downward steadily to a height of approximately 1,250 at a distance of 385,000. The profile then remains relatively flat until a distance of about 395,000, where it rises slightly to a peak of about 1,300. Following this peak, the profile slopes downward again, reaching a height of approximately 450 at a distance of 415,000.

nommen. Die Ergebnisse von GPS, die dort mit einem automatischen Lasertrakter (Geodimeter) kontrolliert wurden, bestätigten die Genauigkeiten, die bereits interessant für Kartierungen im Massstab 1 : 50 000 sind (Abb. 8). Ein vergleichbares Problem stellt sich in der Meereshydrologie oder in der Ozeanographie, wo die Strömungsverhältnisse in offenen Gewässern untersucht werden müssen. Nach Möglichkeit sollten auch die Höhenänderungen der Wasseroberfläche, sprich Wellen und Gezeiten, gemessen werden können. In Küstennähe mögen diese Probleme noch lösbar sein, wie aber sieht die Lösung für Messungen in offener See aus? Nach den beschriebenen Möglichkeiten der Satellitengeodäsie liegt die Lösung auf der Hand. Auch hier ist GPS das Lösungswort. In frei treibenden Bojen werden automatische GPS Empfänger montiert. Gegebenenfalls können die Daten direkt ausgewertet und übermittelt werden. Die Position der Bojen kann so in Echtzeit verfolgt werden. Verschiedene Experimente, unter anderem auch in der Nordsee, bestätigen, dass auf diese Art sowohl die Strömung als auch der Tidenhub auf offener See gemessen werden kann. Die Vermessung jeglicher Art aus der Luft verlangt in vielen Fällen ebenfalls sehr hohe Genauigkeiten der kinematischen Positionsbestimmung, denen mit GPS entsprochen werden kann. In der Aerophotogrammetrie, als typisches Beispiel, muss die unbekannte Position der Aufnahmekamera implizit anhand der Fotos bestimmt werden. Dazu sind jeweils koordinatenmässig bekannte Punkte am Boden nötig. Sie werden zur genauen Identifikation jeweils weiss signalisiert. Mit GPS kann nun die Position der Kamera direkt bestimmt werden. Dies hat zur Folge, dass auf das

Signalisieren eines Grossteils der Punkte verzichtet werden kann. Dazu werden allerdings Genauigkeitsforderungen von 10 cm an das GPS gestellt. Tests des IGP im Gebiet von Uster in Zusammenarbeit mit der Vermessungsdirektion haben die Hoffnung bestätigt, dass bei verbesserter Satellitenkonstellation diesen Genauigkeitsanforderungen nachgekommen werden kann.

Eine der spektakulärsten Anwendungen ist wohl die vollautomatische Landung eines Flugzeuges. Nur durch das GPS gesteuert, können Flugzeuge wie von Geisterhand geführt, metergenau zur Landung auf der Piste geführt werden. Derartige Demonstrationen wurden vom Institut für Flugführung der TU Braunschweig durchgeführt. Auf der anderen Seite des Atlantiks gelang es der NASA eine Boeing 737 nur mit GPS geführt sicher zu landen. Im Sommer 1991 flog während einer Bildradar Flugkampagne des Geographischen Institutes der Universität Zürich auch ein GPS-Empfänger des IGP mit. Die GPS-Messungen dienten der genauen Koordinatenbestimmung des Bildradars an Bord des Flugzeuges. Die GPS-Auswertung am IGP ergab den genauen Flugweg. Beispielhaft zeigt die durch GPS aufgezeigte Anflug- und Landephase des Flugzeuges die Möglichkeiten des Satellitensystems (Abb. 9).

Die angeführten Beispiele vermögen vielleicht die Vielfalt der Anwendungen des GPS andeuten, weiterführende Applikationen lassen sich im besten Fall errahnen. Eines jedoch steht fest: Die technologische Revolution im Bereich der Vermessung, Ortung, Navigation, ... ist angebrochen.

Literatur:

McDonald (1991): Navigation Satellite Systems – A Perspective. In: DGPS'91.

Müller, A. (1991): NAVSTAR GPS – Aufbau, Zustand und Planung. Amt für Militärisches Geowesen, Euskirchen, BRD.

DGPS'91 (1991): First International Symposium Real Time Differential Applications of the Global Positioning System. Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, Verlag TÜV Rheinland.

Cocard, M., A. Geiger (1990): GPS en mode cinématique. In: Cours sur la méthode GPS, Institut de Géodésie et de Mensuration, EPF Lausanne.

Cocard, M., A. Geiger, H.-G. Kahle (1991): Interner Bericht, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.

Janes Spaceflight Directory 1988–89.

Rockwell International NAVSTAR-GPS.

Florida today 30. 6. 91 dry spell for GPS programm nears end USA Today Special Advertising Sektion: NAVSTAR.

Rockwell International: GPS Fact Sheet.

Weltenzyklopädie der Raumfahrt.

Stanek: Raumfahrtlexikon.

Flugrevue 9/91 GPS – ein fast perfektes System.

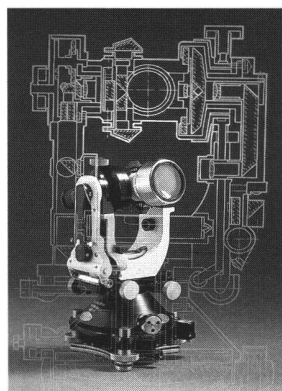
Adressen der Verfasser:

Men J. Schmidt
Wissenschaftspublizist
Astronomie und Raumfahrt
Kirchstrasse 56
CH-9202 Gossau

Dr. Alain Geiger
Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich

**Limitierte
Auflage
500
Exemplare**

Preis: sFr. 28.–
inkl. Porto
und Verpackung



Das Titelbild des Sonderheftes 3/92 kann als Poster (Kunstdruckpapier ca. 35 x 42 cm / ohne Textindruck) bestellt werden.

Der Erlös geht zugunsten der Zeitschrift.

Wäre dies nicht die Geschenkidee für besondere Anlässe?

Bestellungen richten Sie bitte an:

SIGWERB AG
Dorfmatenstrasse 26
5612 Villmergen
Telefon 057/23 05 05, Fax 057/23 15 50