Navigation : wird dies der zukünftige magische Integrationsbegriff für erweiterte Dienstleistungen, Kommerzialisierung und Popularisierung der Geodäsie sein?

Autor(en): **Matthias, H.J.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **83 (1985)**

Heft 4

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-232588

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Navigation

Wird dies der zukünftige magische Integrationsbegriff für erweiterte Dienstleistungen, Kommerzialisierung und Popularisierung der Geodäsie sein?

H. J. Matthias

In [1] schreibt John D. Bossler, der Direktor des US National Geodetic Survey: ‹Niemand kann heute alle Entwicklungen voraussehen, die die neuen Technologien in der Geodäsie verursachen werden. Verschiedene Dinge sind aber so gut wie sicher: Ob wir nun dazu bereit sind oder nicht, werden sich die Veränderungen im Lauf des nächsten Dezenniums in eher raschem Rhythmus vollziehen. Sie werden weit gefächert und irreversibel sein. Sie werden nicht nur die Art und Weise beeinflussen, wie wir Fixpunktnetze bestimmen, sondern auch unsere organisatorischen Strukturen, die Ausbildung, die Praxis und die zukünftige Rolle der Vermessungsfachleute verändern. Die neuen Möglichkeiten werden neuartige Dienstleistungen mit erweiterten Anforderungen mit sich bringen, die heute noch gar nicht denkbar sind. Trotz der natürlichen Tendenz des Menschen, sich gegen Veränderungen zu sträuben, werden diese eintreten. Die geodätische Revolution hat begonnen.›
Dieser Aufsatz berichtet anhand der Literatur über diese Entwicklungen und vermittelt einen Überblick über die Satellitenbewegung und die geodätischen Satellitenmesstechniken.

John D. Bossler, le directeur du US National Geodetic Survey décrit dans [1]: ‹Personne ne peut prévoir aujourd'hui tous les développements qui résulteront des technologies nouvelles dans la Géodésie. Pourtant, il y a des faits qui sont pour ainsi dire sûrs et certains: Quoi que nous soyons prêts ou non, les changements se feront au cours de la décennie à venir d'un rythme plutôt accéléré. Ils s'étendront sur un champ très vaste, et ils seront irréversibles. Ils influenceront non seulement la manière dont nous déterminons des réseaux de points de base, mais également nos structures d'organisation, la formation, la pratique et le rôle des géodésiens à l'avenir. Les nouvelles possibilités amèneront de nouveaux services à remplir et des exigences actuellement inimaginables. Ces innovations prendront place malgré la tendance naturelle de l'homme à se raidir contre tout changement. La révolution géodésique a commencé.›
Moyennant la littérature cet essai donne une vue d'ensemble sur ces développements ainsi que sur le mouvement des satellites et les techniques de mesures géodésiques.

Inhalt

1. Vom Vor-Satellitenzeitalter ins Zeitalter der Satellitengeodäsie. Das Transit-System
2. Navigation 2000. Zukunftsvisionen
3. Das Navstar GPS-System
4. Schlussbemerkungen
Anhang:
5. Kleines Lexikon der Begriffe, Abkürzungen und Bezeichnungen
6. Die Satellitenbewegung
7. Über geodätische Satellitenmesstechniken
Literaturverzeichnis

1. Vom Vor-Satellitenzeitalter ins Zeitalter der Satellitengeodäsie. Das Transit-System

In [1] wird der im Gang befindliche Wandel mit den beiden o. g. Begriffen epochemachend gewichtet: Mit der erfolgreichen Lancierung des ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik I am 4. Oktober 1957 (ø 60 cm, 60 kg, Höhe 228 bis 947 km, Ortungssignale 1 W, Lebensdauer 92 Tage) hat für die Geodäsie das neue Zeitalter begonnen. In den seither vergangenen, knapp etwas mehr als 25 Jahren, haben verschiedene fortschrittliche geodätische Organisationen mit ihren Mitarbeitern in grossem Umfang sowohl von den neuen Möglichkeiten profitiert als auch bedeutende Beiträge zur Weiterentwicklung geleistet.
Die Möglichkeiten für interkontinentale Beobachtungen mittels Satelliten haben sich als zahlreich und vielversprechend erwiesen und es entwickelten sich vielerlei Arten von Satellitenverfolgungs- und -beobachtungssysteme.
Unterdessen hat die Fülle von Satelliten und Satellitenbeobachtungssystemen, von denen viele ganz besonderen Zwecken und nur indirekt der Geodäsie dienen, Datenmaterial von enormem Ausmass erstmals mit tatsächlich weltumspannenden Messverfahren geliefert. Damit gelang es den Geodäten, auf dem Weg zur Bestimmung der Form und Grösse der Erde und ihres Schwerefeldes, riesengrosse Schritte zu tun: Die Genauigkeit der gegenseitigen Lage der wichtigsten geodätischen 'Datums' von 100–200 m aus der Vorsatellitenära ist auf 2–10 m erhöht worden. Die Figur des Geoides ist weltweit bestimmt unter Einschluss der Ozeane und von bisher unvermessenen abgelegenen Kontinentalflächen und wird kontinuierlich verfeinert. Die Genauigkeit der gegenseitigen Lage von einerseits auf den Massenschwerpunkt zentrierten Ellipsoiden und anderseits bestanscchliessenden Ellipsoiden erreicht bereits die Grössenordnung von 1 m.
Von den verschiedenen o. g. Systemen ist das US Navy Navigation Satellitensystem, auch Transit genannt, dasjenige, das neben seiner eigentlichen Bestimmung, bisher und sicher auch noch für einige Zeit, für die Gesellschaft ganz allgemein, für die kommerzielle Schiffahrt im besonderen und auch für die Geodäsie, die weitaus grösste Rolle gespielt hat. Es wurde – die nachfolgenden Ausführungen stützen sich auf [2] – von F. T. Mc Clure erfunden und im Mai 1958 zum Patent angemeldet. Transit wurde zur Unterstützung der Polarisraketen-Unterseeboote als Teil des FBMWS[1] von SSPO seit 1963 betrieben und unterhalten, seit Oktober 1983 zusammen mit NSC. Im Jahre 1967 wurde es auf Anordnung der Regierung für die breite öffentliche Nutzung dienstbar gemacht. Zur Zeit sind fünf einzelne Satelliten dreier verschiedener Bauarten operationell verwendbar; nahezu kreisförmige polare Umlaufbahn mit Radius rd 1100 km und rd 106 Min. Umlaufdauer, Masse ca. 50 kg, 130 kg, 170 kg, polarisierte hochpräzise Sendefrequenzen 400 MHz, 150 MHz, Leistung 1–5 W; Speicher für Bahndaten; sonnenzellengespiesene Batterie; nach dem Schweregradient stabilisierte Antenne. Das Netz zur kontinuierlichen Bahnbestimmung mit der Dopplermessmethode umfasst vier Stationen und ein Rechen-

[1] s. Ziffer 5: Kleines Lexikon der Begriffe, Abkürzungen und Bezeichnungen

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich
Separata Nr. 88

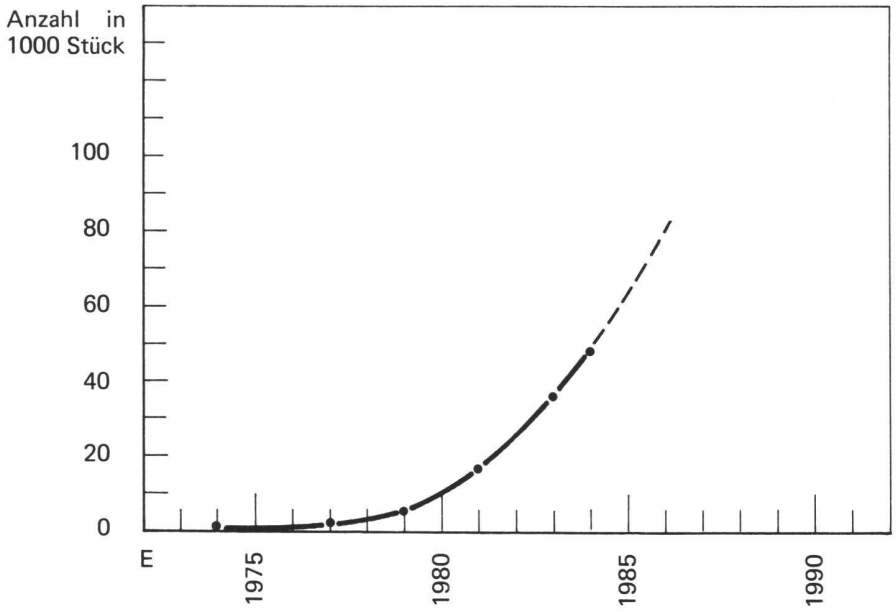


Abb. 1 Weltweite Anzahl der Satellitenempfänger; ohne sozialistische Länder [2].

zentrum. Die prädizierten Bahndaten werden täglich ein- bis zweimal in die Speicher der Satelliten geladen. Die Genauigkeit der Ephemeridenprädiktion der Transitsatelliten hat seit 1963 bis heute ausserordentlich zugenommen, von anfänglich $\sigma \approx 100$ m auf heute σ: wenige Meter für die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Bahnkoordinaten eines Beobachtungsbogens. Dies ist vor allem der feineren Modellierung des Erdschwerefeldes, der Berücksichtigung der Polschwankungen und der Drag-Kompensation zuzuschreiben.

Zur Zeit gibt es rund 1000 staatliche Benützer aus den USA und weltweit rund 50 000 Satellitenempfangsanlagen. Die Grafik dieser Entwicklung, Abbildung 1, berechtigt zur Annahme, dass noch ausserordentliche Entwicklungen bevorstehen. Das Transitsystem ist für diese vielen Benützer nützlich und zuverlässig. Der US-Federal Navigation Plan sieht vor, dass es bis 1994 von SSPO und NSC betrieben und unterhalten wird. Dafür stehen u. a. über ein Dutzend Reservesatelliten und die nötigen Weltraumraketen bereit. Einsätze von Spaceshuttle sind für das Transitsystem nicht vorgesehen.

2. Navigation 2000, Zukunftsvisionen

2.1 Überblick

Die Konferenzpapiere [3] vermitteln einen beeindruckenden Überblick über Stand und Zukunft der Navigation. Die rund 30 Beiträge betreffen den weltweiten Einsatz im Weltraum, in der Atmosphäre, auf den Kontinenten sowie auf und im Wasser der Weltmeere. An Benützergruppen werden einmal das Militär mit Truppen, bemannten und unbemannten Fahrzeugen und Waffensystemen aufgeführt. Zum anderen sind es im zivilen Sektor einerseits die professionellen Transportsysteme aller Art, die Rettungssysteme sowie die Anwender für die Erkundung und Nutzung der natürlichen Ressourcen und andererseits die individuellen zivilen Benützer für Freizeit, Sport und Wettkampf. Viel Raum wird in [3] den Anforderungen der verschiedenen Benützergruppen an die ständige Funktionstüchtigkeit, die Zuverlässigkeit, die Genauigkeit, die einfache Handhabung und an die Kompatibilität verschiedener nationaler und allenfalls zukünftiger privater Systeme eingeräumt. Im professionellen Transportbereich spielen Kosten-Nutzenüberlegungen eine grosse Rolle. Viele bestehende lokale und regionale Navigationseinrichtungen können im Lauf der Zeit entfallen und dennoch die Navigation verbessert und damit massgebliche Einsparungen an Treibstoff erreicht werden. Endlich sind viele Ausführungen der Notwendigkeit und den Möglichkeiten einer Gebührenerhebung bei allen Benützern gewidmet.

Im Jahr 2000 wird das neue System GPS, s. Ziffer 3, zehn Jahre lang in vollem Betrieb sein. Über Zukunftsvisionen, die durch diese Aussicht ausgelöst wurden, wird in [4] berichtet:

2.2 Hydrographische Vermessung

Hydrographische Vermessungen umfassen See- und Schifffahrtstopographie und -kartographie, geophysikalische Prospektion, Suche und Bergung von Wracks und anderen Objekten, Ortung von Eigentums- und Nutzungsrechten, Ingenieurvermessung auf offener See bei der Gewinnung von Bodenschätzen. Die vielen gegenwärtig verwendeten Schall- und Inertialvermessungssysteme werden durch Satellitennavigation ersetzt werden.

2.3 Geodäsie, Landesvermessung, Vermessungswesen, Instrumentenbau

Weltweit betrachtet und unter Berücksichtigung aller Aufgabenstellungen im Vermessungswesen werden Satellite-Vermessungsmethoden bei der Punktbestimmung eine sehr grosse Rolle

	Genauigkeit[2] 2σ	ca.
Luftfahrtnavigation		
Über den Ozeanen		12,6 nm
Flugrouten über den Kontinenten, Anflug		500–4000 m
Helikopterflüge		500–1000 m
Anflug, nicht genau		100 m
Präzisions-Anflug Kategorie I	H 9,1 m	V 3,0 m
Kategorie II	H 4,6 m	V 1,4 m
Kategorie III	H 4,1 m	V 0,5 m
Schiffahrtnavigation		
Ozeane- und Küstennavigation		460–3700 m
Suchoperationen, Seefahrtsrecht		90– 460 m
Vergnügungsfahrten		30– 180 m
Hafennavigation		8– 20 m
Ölexploration und andere Bodenschätze, Wissenschaftliche Missionen		100 m
Meeresgeodäsie		1– 30 m
Navigation auf dem Festland		
Öffentliche Sicherheit		80– 300 m
Transportwesen		150–3000 m
Autobahnen-Inventar		30 m
Bodeninventar		10– 50 m
Vermessungswesen		0,1– 5 m

Tab. 1 Genauigkeitsanforderungen für die Navigation gemäss [5]
nm: nautical miles; m: Meter; H: horizontal; V: vertikal
[2] ‹absolute› Genauigkeit.

spielen. Ohne Einschränkungen gilt diese Aussage wahrscheinlich in extensiv genutzten Gebieten und bei kleinen und mittleren Massstäben. Satelliten-Verfahren sind aber auch für Aufgaben der Geodäsie und Landesvermessung bei hohen Genauigkeitsansprüchen geeignet. Zum Teil wird das gar für die amtliche Vermessung und die Ingenieurvermessung gelten. Im Lauf der Zeit wird sich ein Übergangsbereich von Aufgabenstellungen ergeben, wo sowohl Satelliten- als auch konventionelle Vermessungstechnik, unter besonderer Berücksichtigung von Topomaten [6], zur Anwendung kommen. Für die Wahl des Verfahrens wird im einzelnen die Art und Dichte der Bodenbedekkung eine Rolle spielen, die Punktdichte, die benötigte Arbeitszeit, die Kosten für Personal, Geräte und Auswertung sowie die Genauigkeit und Zuverlässigkeit.
Ganz sicher ist, dass die Satelliten-Navigationsgeräte in der Geschichte des geodätischen Instrumentebaus und der geodätischen Messtechnik den Übergang zu einer neuen Epoche darstellen; Feinmechanik und Optik werden auch auf diesem Gebiet einen sehr grossen Teil ihrer bisherigen grossen Bedeutung an die Elektronik verlieren. Weitere Ausführungen s. Ziffer 4.

2.4 Flugnavigation

Für Flugzeugempfänger wird die Preisklasse von $ 1500 mit zugehörigem kleinem Computer vorausgesagt, der für verschiedenste Zwecke programmierbar ist. Viele Flughäfen rund um die Welt werden Differential-Messverfahren, s. Ziffer 7.7, mit Relativ-Genauigkeiten von 5 m gegenüber der Piste ermöglichen. In allen anfliegenden Flugzeugen kommen die dreidimensionalen Koordinaten der Aufsetzpunkte, der Gleitwinkel, die Windgeschwindigkeit und Windrichtung zur Anzeige. Tausende von Flughäfen werden während bedeutend längeren Perioden des Jahres sichere Landungen und Abflüge gewährleisten. Allerdings können Satellitensysteme ein MLS-System nicht ersetzen.

2.5 Automobilnavigation

Als letzte werden wohl die Fahrzeuglenker von Privatwagen durch Satellitennavigatoren mit Monitoraufzeichnung und Sprachsynthesizer sicher ans Ziel geführt. Zuerst werden voraussichtlich Kranken-, Feuerwehr-, Polizeifahrzeuge, Taxis, Cars und Lastwagen mit diesen nützlichen Einrichtungen ausgerüstet sein. Natürlich sind dafür mehr Voraussetzungen zu erfüllen als bei der Navigation zur See oder in der Luft, z. B. Strassen- und Stadtpläne in digitaler Form, Hausnummern mit zugehörigen geeigneten Koordinaten.

2.6 Billige Satelliten-Empfänger. Einfache Handhabung, reicher Informationsgehalt

Einfache Empfänger werden rund $ 500 kosten. Das ist weniger als z. B. der Preis für eine Autoklimaanlage und gar viel weniger als der Preis für viele konventionelle optisch-mechanische Vermessungsinstrumente. Dieser Umstand ermöglicht es Millionen von individuellen Konsumenten, weltweit an jedem Ort, zu jeder Zeit und unter allen denkbaren äusseren Bedingungen, Navigationsdaten zu empfangen, z. B. Weltzeit, Ortszeit, Zonenzeit, geographische Lage in verschiedenen Koordinatensystemen, Meereshöhe, momentane Bewegungsrichtung auf der Erde samt Geschwindigkeit. Dieses ausserordentliche Preis-Leistungsverhältnis wird durch eine unübertreffbare Einfachheit der Handhabung ergänzt sein. Ohne Fachkenntnisse und ohne Näherungswerte für Zeit und Ort, ohne Navigationskarten, Kalibrierung, Justierungen, manuelles Abstimmen und ohne Fehlerrisiko kann der Empfänger eingeschaltet werden, und bereits in wenigen Minuten, und hernach kontinuierlich, erfolgt die Anzeige der Navigationsdaten.

2.7 Leichte Satelliten-Empfänger

Die Geräte werden nicht nur einfach zu handhaben und billig, sondern auch extrem klein und handlich sein. Dieser Umstand ist z. B. für Wanderer, Campierer, Jäger, Fischer, Bergsteiger, Skifahrer, Forscher, Förster, Orientierungsläufer, Schwimmer, Segler, Kanuten, Reiter, Pfadfinder, militärische Truppführer u. v. a. m. von Bedeutung, insbesondere etwa nachts, im Nebel, bei Sturm oder in der Wildnis.

2.8 Hohe Genauigkeit für alle zivilen Benützer

Entgegen erklärter Absicht, s. Ziffer 3.7, erscheint es wahrscheinlich, dass die Codes für hohe Genauigkeit, s. Ziffer 3.4, im Lauf der Zeit doch allen zivilen Benützern zugänglich gemacht werden, so dass die Möglichkeiten von Satellitensystemen auf sehr breiter Basis voll ausgeschöpft werden können.

2.9 Weltweites Datum

Satellitennavigatoren können Transformationsberechnungen, z. B. zwischen globalen geographischen Lagekoordinaten und beliebigen nationalen oder lokalen Projektionskoordinatensystemen, berechnen. Allerdings verbleiben für den Benützer, vor allem für den sehr mobilen, dennoch Schwierigkeiten: er muss über die Transformationsprogramme und deren genaue Definitionsbereiche verfügen. Für gewisse Anwendungen wird sich deshalb im Lauf der Zeit der Trend abzeichnen, weltweit einheitliche Projektions- oder Raumkoordinatensysteme einzuführen.

3. Das Navstar GPS-System

Die Ausführungen in diesem Abschnitt stützen sich auf [7], [8]. Das Navstar Global Positioning System wird ein im Raum realisiertes (space-based), kontinuierlich funktionierendes Allwetter-Navigationssystem darstellen, das allen Benützern mit hoher Genauigkeit weltweit die Lage und Höhe ihrer Position, die Zeit und allenfalls die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung ihres Fahrzeugs anzeigt. Navstar ist ein Projekt des DOD. Es wird von der Raumfahrtdivision der Luftstreitkräfte geleitet; beteiligt sind alle Dienste des DOD, die Nato und Australien.

3.1 Segmente

GPS umfasst drei Hauptsegmente: die Satelliten, das terrestrische Kontrollnetz, die Empfangsgeräte der Benützer.

3.2 Aufbauphasen

Die erste Phase von Ende 1973 bis 1979 umfasste die Überprüfung des Konzepts. Satelliten wurden gebaut und in Umlauf gebracht sowie eine vorläufige terrestrische Kontrollstation eingerichtet. Der Erfolg war ausserordentlich. Mit dem PPS-Code und der Messtechnik gemäss Ziffer 7.3.3 lag der räumliche Navigationsfehler eines Flugzeugs während 95% der Flugzeit innerhalb von 55 m und während 50% der Flugzeit gar innerhalb von 16 m. Für die selben 95% bzw. 50% der Flugzeit ergaben die entsprechenden Zahlen, wenn nur der ebene horizontale Navigationsfehler betrachtet wird, gar nur 25 m bzw. 10 m. Erstaunlicherweise waren die Resultate mit dem SPS-Code ebensogut.
Die seit Mitte 1979 im Gang befindliche zweite Phase sollte bis Ende 1984 dauern und umfasste den Versuchsbetrieb sowie die Entwicklung und Erprobung aller Segmente, nämlich Satelliten, Kontrollstationen und Benützernavigationsinstrumente. Gegenwärtig sind fünf voll funktionstüchtig; ein GPS-Satellit ist nur beschränkt nutzbar, da die atomaren Frequenznormale nicht mehr funktionieren. Nun wird DSARC über die Auslösung der dritten Phase, den Vollausbau, entscheiden.
Für die dritte Phase waren die Jahre ab 1985 vorgesehen. Mit Space shuttles sollten bis Ende 1987 zwölf Satelliten aus der Serienproduktion lanciert werden für die zweidimensionale Navigation und bis 1988 weitere sechs, so dass achtzehn Satelliten für die weltweite räumliche Navigation eingesetzt sind. Dieses Zeitprogramm wird nun aber überschritten. Nächste Starts sind für die zweite Hälfte 1986 geplant.

3.3 Satellitenbahnen, Geographische Überdeckung

s. Abbildung 2

Auf sechs verschiedenen Bahnen sind 18 Navstar-Satelliten vorgesehen, je drei gleichmässig über eine Bahn verteilt. Die Bahnen mit a rund 26 600 km, d. h. einer Höhe über der Erdoberfläche von rund 20 000 km, sind nahezu kreisförmig. Die Umlaufzeit beträgt genau 12 h bzw. 720 Min.

Auf den Bahnen mit den Satelliten Nr. 1, 2, 3 bzw. 13, 14, 15 bzw. 7, 8, 9 ist je ein weiterer aktiver Reservesatellit vorgesehen. Mit dieser Disposition wird, ausgenommen von ganz kurzen täglichen Zeitabschnitten in einigen wenigen begrenzten Regionen, weltweit eine gute ‹Satellitenbedeckung›, d. h. mindestens vier Satelliten bei guter geometrischer Konfiguration und damit gute Genauigkeit und Zuverlässigkeit gewährleistet.

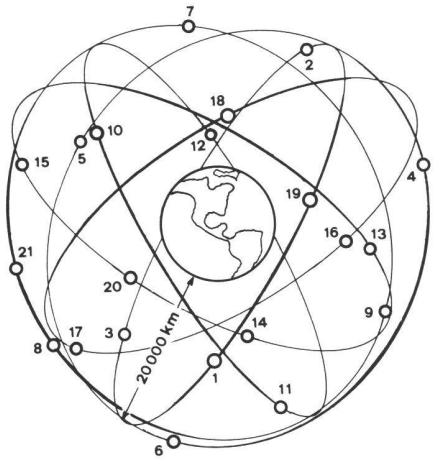


Abb. 2 Navstar global Positioning System. Die sechs Orbits mit 19 Satelliten, aus [8].

3.4 Satellitensignale

Es gibt zwei Trägerfrequenzen $L_1 = 1575.42$ MHz (λ rd. 19 cm), $L_2 = 1227.6$ MHz (λ rd. 24 cm) und zwei binäre Zufallscodes PPS, SPS.

Der PPS-Code für hohe Genauigkeit ist eine Serie von dualen PRN-Signal-Sequenzen, die den Frequenzen L_1 und L_2 aufmoduliert wird. Diese Sequenz ist so lang, dass sie sich während vielen Wochen nicht wiederholt. Die Frequenzen, mit der sich die dualen ‹1› und ‹0› folgen, sind 10.23 MHz. Der PPS-Code ist zudem mit 50 bit pro Sekunde mit den Daten aus dem Satellitenspeicher über die Bahnelemente und die Satelliten-Uhrkorrektion moduliert.

Der SPS-Code für Standard-Genauigkeit ist analog konzipiert, jedoch nur der L_1-Frequenz aufmoduliert. Die Signalsequenzen wiederholen sich jede Millisekunde, und die dualen Zeichen ‹1› und ‹0› wechseln mit 1.023 MHz. Auch diese Frequenz ist zusätzlich mit 50 bit pro Sekunde moduliert und vermittelt die Bahnelemente und die Satelliten-Uhrkorrektion.

PPS- und SPS-Codes werden von Navstar-Satelliten in der Weise ausgesendet, dass die Systemzeit für jedes Signal und jeden Signalübergang genau bekannt ist. Dazu sind die Satelliten mit Cäsium-Atomuhren ausgerüstet, die durch eine Stabilität von ca. 10^{-12} gekennzeichnet sind.

3.5 Das operationelle Kontrollsegment

Es wird eine Master Control Station MCS in Colorado Springs und fünf weit verteilte Monitor-Stationen MS umfassen. Die MS verfolgen alle GPS-Satelliten über ihrem Horizont und übermitteln alle Messresultate zur MCS. Hier werden die Bahnelemente, die Ephemeriden der Satelliten, die Systemzeitkorrektionen und Refraktionsdaten berechnet. Mindestens drei Mal pro Tag werden sie an die Satelliten übertragen zur Aufdatierung ihrer Code-Daten.

3.6 Messmethoden und erzielbare Genauigkeit

Die Methoden für die eigentliche Navigation mit Orts- und Höhenbestimmung, Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit sowie Zeit sind in Ziffern 7.3.3, 7.3.4, 7.4 beschrieben. Für Erdmessung, Geodynamik, Landesvermessung, u. U. z. T. amtliche Vermessung und Ingenieurvermessung, kommen wahrscheinlich vor allem die Methoden gemäss Ziffern 7.3.4, 7.5 in Frage. Über die erzielbare Genauigkeit orientiert Tabelle 3.

3.7 Zugänglichkeit der Signale, Benützergebühren

Es ist erklärte Absicht, dass der PPS-Code auf der L_1- und L_2-Frequenz nur für militärische Zwecke der USA zur Verfügung stehen soll. PPS ist bei Anwendung von Pseudoentfernungsmessung und Dopplerverfahren gemäss Ziffern 7.3.3, 7.4 durch eine Genauigkeit $\sigma_{\lambda P, \Phi P, hP}$ ca. 10–15 m gekennzeichnet. Für andere Benützer und für zivile Zwecke ist ausschliesslich der SPS-Code auf der L_1-Frequenz vorgesehen. Mit Pseudoentfernungsmessung und Dopplerverfahren ist eine Genauigkeit der Punktbestimmung zu erwarten, die mit $\sigma_{\lambda P, \Phi P, hP}$ ca. 50–100 m gekennzeichnet ist. Der ursprüngliche Vorschlag des DOD sah für zivile Anwendungen mit dem SPS-Code eine Genauigkeit von 500 m vor. Eine solche Genauigkeit konnte die Zivilluftfahrt nicht für GPS zur Navigation des Flughafenanflugs begeistern. Dieser Umstand und die Katastrophe der koreanischen Boeing 747 haben dazu geführt, dass die zivile Benützung des SPS-Codes eine Genauigkeit von 2σ ca. 100 m gewährleisten soll. Bei der Anwendung von Differenzverfahren, z. B. gemäss Ziffern 7.6, 7.7, können aber auch mit dem SPS-Code viel höhere Genauigkeiten der relativen Lage von zwei oder mehreren Punkten erzielt werden.

Offen ist die in mancherlei Hinsicht ebenso interessante wie komplexe Frage von Benützergebühren für das GPS-System. Es besteht ein Vorschlag, wonach ein Pauschalbetrag erhoben werden soll von z. B. $ 4000 pro Gerät und Jahr. Neuerdings steht auch ein Nulltarif zur Diskussion. Dabei geht es nicht nur um Privatbenützer aller Art oder professionelle Geodäsie, sondern vor allem um professionelle kommerzielle Anwendungen im Transportwesen in der Luft, zu Wasser und zu Land.

3.8 GPS-Empfänger-Systeme

Vermutlich wird an vielen Orten in der Welt an der Konzeption und der Entwicklung von Satellitenmesssystemen gearbeitet. Einerseits handelt es sich um Systeme als Segment des GPS für die verschiedensten militärischen Zwecke. Andererseits handelt es sich um Systeme für professionelle und private zivile Benützer. Vermutlich wird es im Lauf der Zeit eine grosse Konkurrenz geben. Die Unterschiede ergeben sich einerseits durch die Benützeranforderungen und -wünsche entsprechend den verschiedenen Arten von Konsumenten und anderseits durch die vielen möglichen verschiedenen Messarten gemäss Ziffern 7.1–7.7 und Kombinationen davon.

Für die Geodäsie und das Vermessungswesen sind schon jetzt, in der zweiten Aufbauphase, einige wenige Geräte auf dem Markt erhältlich, u. a. für sehr hohe Genauigkeit, mit Preisen in der Grössenordnung von über 100 K Fr.

4. Schlussbemerkungen

4.1 Geodätische Revolution

Die Ausführungen und Visionen in den Ziffern 2, 3 geben sicher zum Urteil Anlass, dass John D. Bossler in [1], wie in der Zusammenfassung ausgeführt, wahrscheinlich zu Recht von einer bevorstehenden geodätischen Revolution spricht.

4.2 Satellitentechnik bei Landesvermessung, amtlicher Vermessung und Ingenieurvermessung

In Ergänzung zu Ziffer 2.3 wird die Vermutung ausgesprochen, dass Satellitenverfahren in der Landesvermessung eine grosse Rolle spielen werden. Es wird kaum mehr Arbeiten am Fixpunktnetz geben, die nicht auch Satellitenbeobachtungen einschliessen. Ob dies in jeder Hinsicht, unter Berücksichtigung der Kriterien Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Zeitfaktor, praktische Erfordernisse, wissenschaftliches Interesse

und Aufwand gerechtfertigt sein wird, ist kaum massgebend. Vielleicht gibt es einmal mit Satellitenverfahren viel rationellere Arbeitsabläufe als bisher.
In den Monaten Juli und August 1984 hat das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit mehreren ausländischen Instituten unter der Leitung von Prof. Dr. H.-G. Kahle Messungen für zwei satellitengeodätische Projekte in der Schweiz durchgeführt. Im Projekt SWISSDOC wurden in zwei Kampagnen die Lage und Höhe von 19 Punkten der Landestriangulation mit Dopplermessungen zu Transit-Satelliten bestimmt. Mit dem Projekt ALGEDOP wurden die Koordinaten und Höhen von Punkten des Landesnivellements im Alpenraum eingemessen. Das Programm ALGEDOP erstreckt sich über mehrere Jahre [9].
Die relativ zurückhaltende o. g. Formulierung gilt – wenn überhaupt – nur für Länder mit traditionsreichen guten Landesvermessungen. In Ländern, wo solche noch aufgebaut werden müssen, werden Satellitenmethoden die übrigen wohl vollständig ablösen. Auch bei Punktnetzen niedriger Ordnung wird die Satellitenmethode eine wichtige Rolle spielen. Von den in Ziffer 2.3 genannten Kriterien stehen deren zwei im Vordergrund: Einmal ist es der grosse Vorteil, dass gegenseitige terrestrische Visuren nicht mehr erforderlich sein werden, s. Abbildung 11. Nachdem die EDM vor 20 Jahren schon eine wesentlich grössere Freiheit der Punktdisposition ermöglichte, bringen Satellitenverfahren nun fast gar völlige Freiheit. Das zweite Kriterium sind die Kosten. Bei der amtlichen Vermessung wird das kostengünstigere Verfahren wohl immer eine grosse Rolle spielen. Der soeben genannte grosse Vorteil wird dazu führen, dass Satellitenverfahren auch für die Bestimmung von Basispunkten und Grenzpunkten in schwierigem Gelände angewendet werden, z. B. im Wald, im Hochgebirge und bei sehr geringer Punktdichte.
Es vergehen sicher nicht mehr viele Jahre, bis eingehende Diskussionen über die Methoden der Fixpunktbestimmung aller Ordnungen geführt werden.

4.3 Zur Ausbildung

Navigation mit Satellitenverfahren wird eine grosse professionelle und private Verbreitung in der Gesellschaft erfahren. Vielleicht wird man gar, wie bei der Informatik, von einer Popularisierung sprechen können. Die Kultur- und Vermessungsingenieure und die Berufsangehörigen aller Stufen gehören zu jenen Fachleuten, die darüber Bescheid wissen müssen. Die Elemente der Navigation und Satellitengeodäsie werden zu Bestandteilen der Vermessungskunde.

Anhang

5. Kleines Lexikon der Begriffe, Abkürzungen und Bezeichnungen

ALGEDOP
*A*lpine *Geo*id *Do*ppler *P*roject

Aphel
Sonnenfernster Punkt einer Planetenbahn

Apogäum
Erdfernster Punkt einer Satellitenbahn

C/A
Coarse (oder Clear)-Code and Aquisition; identisch mit SPS

DOC
US-*D*epartment of *C*ommerce

DOD
US-*D*epartment of *D*efense

Doppler
Name des österreichischen Physikers C. Doppler 1803–1853. Physikalische Erscheinung bei Schallwellen und elektromagnetischen Wellen. Wenn Sender und Empfänger sich relativ zueinander bewegen, ist die empfangene Frequenz gegenüber der Senderfrequenz um die sog. Dopplerfrequenz verschoben; diese Verschiebung ist von der Geschwindigkeit der Relativbewegung abhängig

DOT
US-*D*epartment of *T*ransportation

Drag
In diesem Zusammenhang: Bremswirkungen, Widerstand

DSARC
US-*D*efense *S*ystems *A*cquisition *R*eview *C*ouncil

EDM
*E*lectronic *D*istance *M*easurement

Ephemeriden
Vorausberechnete Tabellen von topozentrischen Örtern von Gestirnen oder Satelliten

FBMWS
US-*F*leet *B*allistic *M*issile *W*eapon *S*ystem

GPS
*G*lobal *P*ositioning *S*ystem. Gehört zum Begriff Navstar

Inertialsystem
Ein Bezugsystem, in dem die Gesetze der klassischen Mechanik, insbesondere der Schwerpunktsatz und der Drallsatz, mit der empirisch feststellbaren Wirklichkeit übereinstimmen

JSPO
US-*J*oint *S*ervices *P*rogram *O*ffice

Kinematik
Lehre von den Bewegungen

Kinetik
Lehre von den Bewegungen unter Einfluss von inneren und äusseren Kräften

Laser
*L*ight *a*mplification by *s*timulated *e*mission of *r*adiation

Loran
*L*ong *R*ange *N*avigation. Hyperbel-Navigationsverfahren. Nord-Atlantik, Nord-Pazifik, Gebiete an der asiatischen Ostküste, Hawaii, Mittelmeer

MCS
*M*aster *C*ontrol *S*tation

MHz
Megahertz

MS
*M*onitor *S*tation

MLS
*M*icrowave *L*anding *S*ystem. Zukünftiges System, meistenorts noch nicht eingeführt

NATO
*N*orth *A*tlantic *T*reaty *O*rganisation

Navstar
*N*avigation *S*ystem with *T*ime *a*nd *R*anging

NNSS
US-*N*avy *N*avigation *S*atellite *S*ystem

NOAA
US-*N*ational *O*ceanic and *A*tmospheric *A*dministration im US-DOC

NSC
US-*N*avy *S*pace *C*ommand

Omega
Phasen-Hyperbel-Navigationssystem. Weltweit

Orbit
Umlaufbahn z. B. von Planeten, Satelliten

Perigäum
Erdnächster Punkt einer Satellitenbahn

Perihel
Sonnennächster Punkt einer Planetenbahn

PPS
*P*recise *P*ositioning *S*ervice-Code

PRN
*P*seudo *R*andom *N*oise

Radar
*R*adio *D*etection *a*nd *R*anging. Funkortung: Richtungsmessung, evtl. auch Höhenwinkel und Distanzmessung mit impulsmodulierten gebündelten elektromagnetischen Trägerfrequenzen meistens im cm- und dm-Bereich

Secor
*S*equential *C*ollation *R*ange

Short arc
wie Translokation

SPS
*S*tandard *P*ositioning *S*ervice-Code; identisch mit C/A

SSPO
US-Navy *S*trategic *S*ystems *P*roject *O*ffice

SWISSDOC
*S*wiss *D*oppler *O*bservation *C*ampaign

Transit
Satelliten-Navigationssystem im Rahmen von US-NNSS

Translokation
Simultane Anwendung eines geodätischen Satellitenmessverfahrens auf zwei oder mehreren relativ benachbarten terrestrischen Stationspunkten zur Bestimmung von deren gegenseitiger Lage mit hoher Genauigkeit

US
*U*nited *S*tates

VLBI
*V*ery *l*ong *B*aseline *I*nterferometry

a	Grosse Halbachse der Satelliten-Ellipsenbahn
a_E	Grosse Halbachse eines Erdellipsoides
E Aeq	Erdäquator
Hi Aeq	Himmelsäquator
Ag	Apogäum

α	Geozentrische Rektaszension
$\alpha_s{}^*$	Topozentrische Rektaszension des Satelliten, beobachtet von P aus
b	Kleine Halbachse der Satelliten-Ellipsenbahn
C	Korrektur
δ	Geozentrische Deklination
$\delta_s{}^*$	Topozentrische Deklination des Satelliten, beobachtet von P aus
e	erste numerische Exzentrizität $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$
e_E	erste numerische Exzentrizität eines Erdellipsoides
E	– exzentrische Anomalie – Erde – Energie
Ekl	Ekliptik
ε	Schiefe der Ekliptik
F	Brennpunkt
f	Frequenz von elektromagnetischen Trägerwellen oder Modulationsfrequenzen
G	– Erdschwerpunkt, Gravitationszentrum, Geozentrum – Gravitationskonstante ($\approx 6.673 \cdot 10^{-11}\,m^3kg^{-1}s^{-2}$)
Hi Hor	Himmelshorizont
h_P	eine ellipsoidische Höhe des Stationspunktes P
i	Neigung der Bahnebene gegen den Äquator
j, q	Indizes für Satellitenorte, Zeitpunkte
aKn	aufsteigender Knoten
Jnm, Knm	harmonische Koeffizienten der Kugelfunktionsentwicklung des Gravitationspotentials der Erde
λ	– Geographische Länge – Wellenlänge
M	Erdmasse ($\approx 5.976 \cdot 10^{24}$ kg)
M_{Gr}	Meridian von Greenwich
m	Masse des Satelliten
N_{jq}	Dopplerzählung
$\gamma^{\odot}$	Frühlingspunkt. Aufsteigender Knoten der scheinbaren Bahn der Sonne mit dem Himmelsäquator bei geozentrischer Betrachtung
γ	Frühlingspunkt auf der Ekliptik
Ω	Rektaszension des aufsteigenden Knotens
ω	Argument des Perigäums
Pg	Perigäum
P, Q	Geodätischer Stationspunkt, Topozentrum
Pl	Erdpol
Hi Pl	Himmelspol
Φ	Geographische Breite
$r_s(t)$	Schwerpunktabstand von S
$\vec{r}_s(t)$	Fahrstrahl von S; $\lvert\vec{r}_s(t)\rvert = \vec{r}_s(t)$
$\vec{r}_P$	Geozentrischer Ortsvektor des Stationspunktes P
R_E	Erdradius
R'	Störfunktion
$R(\Theta_{Gr})$	Drehmatrix Sternzeit von Greenwich
$\dot{\vec{r}}$	Geschwindigkeit des Satelliten im raumfesten System (X_γ, Y_γ, Z_γ)
$\ddot{\vec{r}}$	Beschleunigung des Satelliten im raumfesten System (X_γ, Y_γ, Z_γ)
S	Satellit
$\vec{s}$	Topozentrischer Beobachtungsvektor zum Satellit
$\lvert s\rvert$	Länge des Vektors $\vec{s}$
$\Delta\lvert s\rvert$	Differenz der Länge von zwei Vektoren $\vec{s}$
$\lvert\dot{s}\rvert$	Partielle Ableitung von $\lvert s\rvert$ nach der Zeit Geschwindigkeit der Veränderung der Distanz zwischen den Punkten P und S
T	Zeitpunkt des Durchgangs des Satelliten durch das Perigäum
t	freie Zeitvariable
t_L	Laufzeit
Θ_{Gr}	Sternzeit von Greenwich
$\dot{\Theta}$	Winkelgeschwindigkeit der Erddrehung
Δt_o	Synchronisationskorrektur (-verbesserung) der Empfängerzeitbasis auf die Satellite-Systemzeit
U	Umlaufzeit des Satelliten um die Erde
v(t)	wahre Anomalie
$\bar{v}$	mittlere Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen längs des Messweges
v_o	Skalare Anfangsgeschwindigkeit des Satelliten in Tangentenrichtung der Bahn
X_γ, Y_γ, Z_γ	‹raumfestes›, geozentrisches Äquatorialsystem, Inertialsystem
ξ, η	‹raumfestes›, geozentrisches, kartesisches, ebenes Koordinatensystem
X, Y, Z	Erdfestes, geozentrisches, kartesisches Äquatorialsystem
Ze	Zenit des Stationspunktes P

6. Die Satellitenbewegung

Diese Darstellungen stützen sich vor allem auf [10] und [11].
Die Bewegung des Satelliten wird durch die kinematischen Anfangsbedingungen und die wirksamen Kräfte (Kinetik) bestimmt.

6.1 Die Keplersche Satellitenbewegung

s. Abbildungen 3–7

Modellannahmen

Kinetik:
Es wirke ausschliesslich die Gravitationskraft zwischen der als kugelsymmetrisch aus homogenen Schalen aufgebaut angenommenen Erdmasse M und der gegenüber M vernachlässigbar kleinen (bzw. der Einheitsmasse gleichgesetzten) punktförmigen Masse m des Satelliten; $m = 1 \ll M$.

Kinematik:

$$\vec{r}\,(t=0) = \vec{r}_o, \quad \dot{\vec{r}}\,(t=0) = \dot{\vec{r}}_o \qquad (1)$$

Dieses sind die beiden vektoriellen Anfangsbedingungen. Sie können durch die sechs skalaren Keplerschen Bahnelemente a_o, e_o, Ω_o, i_o, ω_o, T_o dargestellt werden, s. Abbildungen 3, 4.

Gesuchte Grösse

$\vec{r}(t)$

Lösung

Bei Anwendung des Newtonschen Gravitationsgesetzes führt der Schwerpunktsatz auf die Bewegungsgleichung für den Satelliten von der Masse Eins. Der Beschleunigungsvektor $\ddot{\vec{r}}$ des Fahrstrahls $\vec{r}$ ist in jedem Moment gleich dem auf die Einheitsmasse wirkenden Gravitationskraftvektor der Erde.

$$\ddot{\vec{r}}_s(t) = -\frac{GM}{r^2(t)}\,\frac{\vec{r}_s(t)}{r_s(t)} \qquad (2)^3$$

6.1.1

Für die Anfangsbedingungen $\vec{r}(t=0) = r_o$ und $\dot{\vec{r}}(t=0) = 0$ in einem raumfesten, geozentrischen Koordinatensystem ergibt die zweifache Integration von (2) die Bewegungsgleichung des ‹Absturzes› des Satelliten längs der Geraden S–G.

$$\sqrt{r_o^3}\,\mathrm{arc\,tg}\sqrt{\frac{r_o - r}{r}} - \sqrt{r_o r\,(r_o - r)} - \sqrt{2\,GM}\cdot t = 0 \qquad (3)$$

[3] $\ddot{\vec{r}}$ Zweite Ableitung des räumlichen Fahrstrahls nach der freien Zeitvariablen t

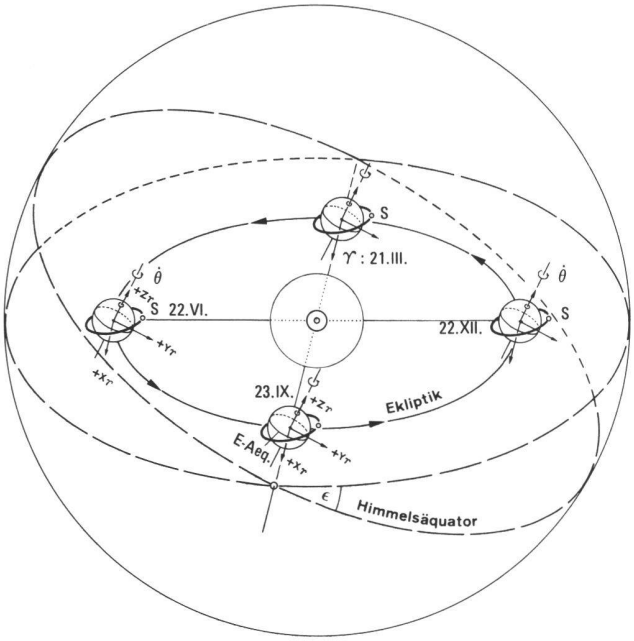


Abb. 3 Heliozentrische Darstellung der Himmelskugel nach der Ekliptikebene horizontiert.

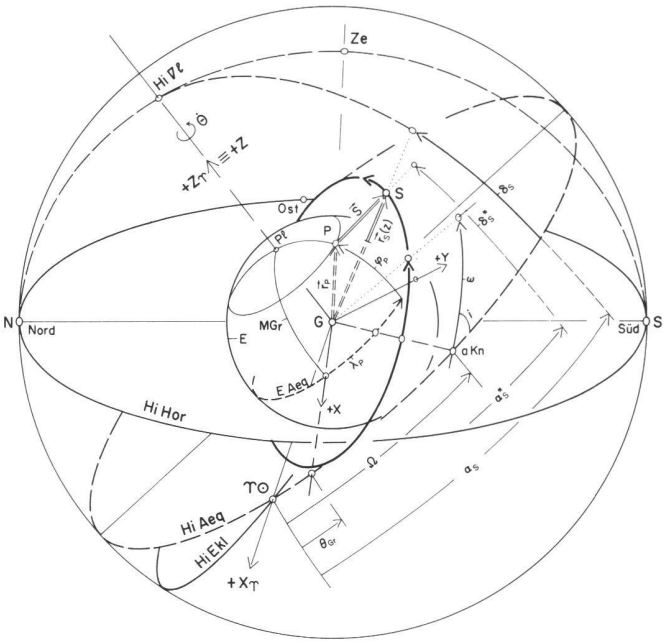


Abb. 4 Geozentrische Darstellung der Himmelskugel nach dem Horizont des Stationspunktes P aufgerichtet.

6.1.2 Allgemeiner Fall in ebener Darstellung

Im Fall der Keplerschen Bewegung spannen die beiden vektoriellen Anfangsbedingungen (1) $\vec{r}_0$, $\dot{\vec{r}}_0$ die raumfeste Ebene der Satellitenbewegung auf.

In dieser Bahnebene wählen wir das raumfeste, geozentrische, ebene, kartesische Koordinatensystem (ξ,η), s. Abbildung 5. Die komponentenweise Darstellung der Vektorgleichung (2) führt auf ein System von zwei gewöhnlichen skalaren, homogenen Differentialgleichungen 2. Ordnung.

$$\ddot{\xi} = -GM\frac{\xi}{(\xi^2+\eta^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\ddot{\eta} = -GM\frac{\eta}{(\xi^2+\eta^2)^{\frac{3}{2}}} \qquad (4)$$

Die algebraische Lösung ist mit Reihenentwicklungen möglich.

$$\xi = r_s(t)\cos v(t)\ ;\ \eta = r_s(t)\sin v(t)$$

wobei (5)

$$r_s(t) = a_0\left[1 - e_0\cos\left\{\sqrt{\frac{GM}{a_0^3}}(t-T_0)\right\} - \frac{e_0^2}{2}\cos\left\{2\sqrt{\frac{GM}{a_0^3}}(t-T_0) - 1\right\} - \ldots\right]$$

$$v(t) = \left[\sqrt{\frac{GM}{a_0^3}}(t-T_0) + 2e_0\sin\left\{\sqrt{\frac{GM}{a_0^3}}(t-T_0)\right\} + \frac{5}{4}e_0^2\sin\left\{2\sqrt{\frac{GM}{a_0^3}}(t-T_0)\right\} + \ldots\right]$$

In den Beziehungen (5) treten die drei skalaren Anfangsbedingungen a_0, e_0, T_0 auf. Mit Ω_0, i_0 wurde – wie erwähnt – die Satellitenbahnebene im Raum festgelegt und endlich über ω_0 dadurch verfügt, dass die Achse ξ durch das Bahn-Perigäum gelegt ist.

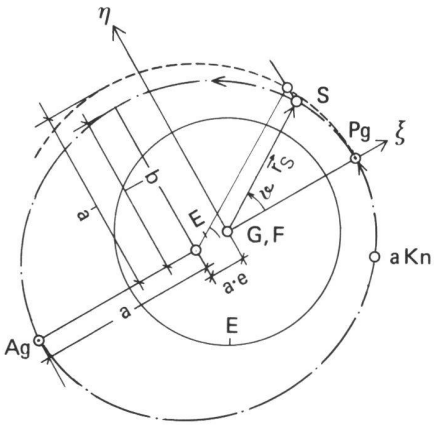


Abb. 5 Keplersche Bahnellipse eines Satelliten. Umklappung aus Abbildung 4.

6.1.3 Zur Interpretation der ungestörten Satellitenbewegung

Die drei Keplerschen Gesetze

Die Satellitenbewegung gemäss den Modellannahmen wird durch die drei Keplerschen Gesetze beschrieben:

- Die Satellitenbahnen liegen in raumfesten Ebenen und sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt das Gravitationszentrum der Erde liegt
- Der Fahrstrahl vom Gravitationszentrum zum Satelliten überstreicht in gleichen Zeitintervallen gleiche Flächen
- Für verschiedene Erdsatelliten ist der Quotient aus dem Quadrat der Umlaufzeit durch die dritte Potenz der grossen Halbachse eine Konstante.

Weitere Merkmale von Keplerschen Satellitenbahnen

Die Gesamtenergie, kinetische und potentielle Energie zusammen, des Satelliten im Gravitationsfeld der Erde ist durch die Anfangsbedingungen $\vec{r}_0$, $\dot{\vec{r}}_0$ bestimmt, ist konstant und bleibt erhalten.

$$E_{tot} = E_{kin} + E_{pot}$$

$$= m\left\{\frac{|\dot{\vec{r}}_0|^2}{2} - \frac{GM}{|\vec{r}_0|}\right\} = m\left\{\frac{v_0^2}{2} - \frac{GM}{r_0}\right\} \qquad (6)^4$$

[4] Das Niveau der potentiellen Energie des Satelliten bezüglich der Erde ist hier für $r = \infty$ zu Null definiert. Die Gravitationskraft erbringt beim Absturz des Satelliten vom Niveau Null bis auf die Erdoberfläche mit $r = r_E$ Arbeit im Gesamtbetrag von $\frac{GMm}{r_E}$; dabei wird E_{pot} auf das Niveau von $-\frac{GMm}{r_E}$ abgebaut. Umgekehrt erbringt eine Rakete, die den Satelliten ausserhalb des Gravitationsfeldes der Erde trägt, die Arbeit von $+\frac{GMm}{r_E}$ und baut dabei E_{pot} wieder auf das Niveau Null auf.

Diese Gleichung stellt ein erstes Integral der Gleichung (2) dar. E_{pot} und E_{kin} ‹halten sich gegenseitig die Waage›. Die Geschwindigkeit von ‹niederen› Satelliten ist grösser als von ‹hohen› Satelliten. Im Perigäum ist E_{kin} Maximum und E_{pot} Minimum bzw. im Apogäum ist E_{kin} Minimum und E_{pot} Maximum.[4] Vom Apogäum ‹stürzt› der Satellit an der Erde vorbei ins Perigäum ab. Dabei wird E_{kin} auf Kosten von E_{pot} aufgebaut. Dann ‹steigt› der Satellit vom Perigäum aus auf das höhere Niveau von E_{pot} im Apogäum zurück und büsst dabei sukzessive wieder an Geschwindigkeit bzw. E_{kin} ein. Diese ‹Pendelbewegung› kommt durch die harmonische Struktur der Formeln (5) gut zum Ausdruck.

Kreisbahnen und Satellitenbahnen mit parallelen Achsen sind nur dann möglich, wenn $\dot{\vec{r}}_0$ und $\vec{r}_0$ einen rechten Winkel bilden; s. Abbildung 6. In allen andern Fällen drehen die Achsen derart, dass entsprechende Brennpunkte auf einer Geraden liegen, s. Abbildung 7.

Die Grösse der grossen Halbachse a ist ausschliesslich von der Gesamtenergie E_{tot} im Anfangspunkt abhängig, also von $|\vec{r}_0|$, $|\dot{\vec{r}}_0|$, nicht aber vom Winkel, die diese beiden Vektoren miteinander einschliessen. Die Art der entstehenden Bahn, Ellipse (Kreis, Parabel) oder Hyperbel, ist demgegenüber ausschliesslich durch das Verhältnis von E_{pot} zu E_{kin} im Anfangspunkt bestimmt, s. Formel (6). Auf Ellipsenbahnen bewegen sich Satelliten, deren Gesamtenergie nicht ausreicht, um das Gravitationsfeld der Erde zu verlassen. Parabelbahnen sind Grenzfälle; der Satellit vermag das Gravitationsfeld der Erde gerade zu verlassen, verbraucht dabei aber alle seine kinetische Energie. Satelliten, die das Gravitationsfeld eines anderen Himmelskörpers erreichen sollen, müssen dazu auf eine hyperbolische Bahn gebracht werden.

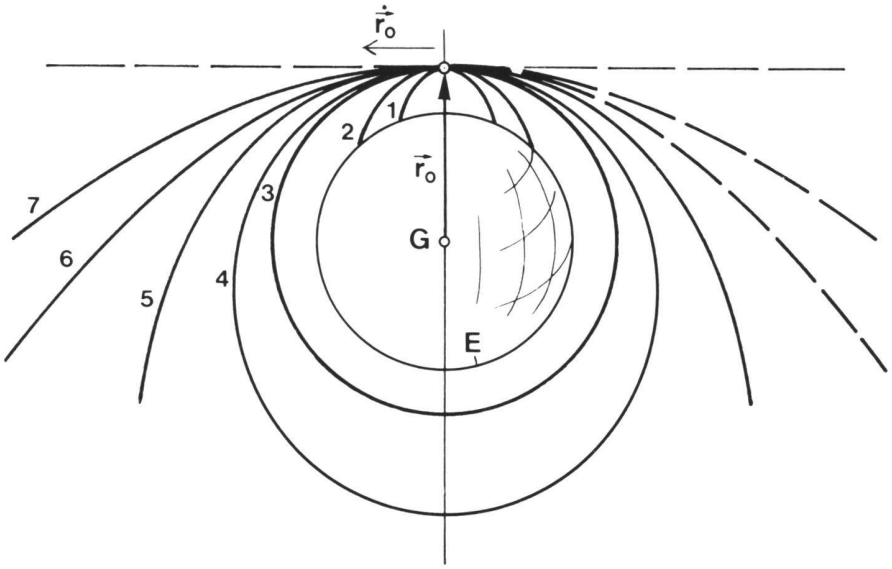


Abb. 6 Bahnkurven für $\dot{\vec{r}}_0 \perp \vec{r}_0$

Nr. 1, 2, 4, 5: Ellipsen;
Nr. 3: Kreis;
Nr. 6: Parabel;
Nr. 7: Hyperbel.

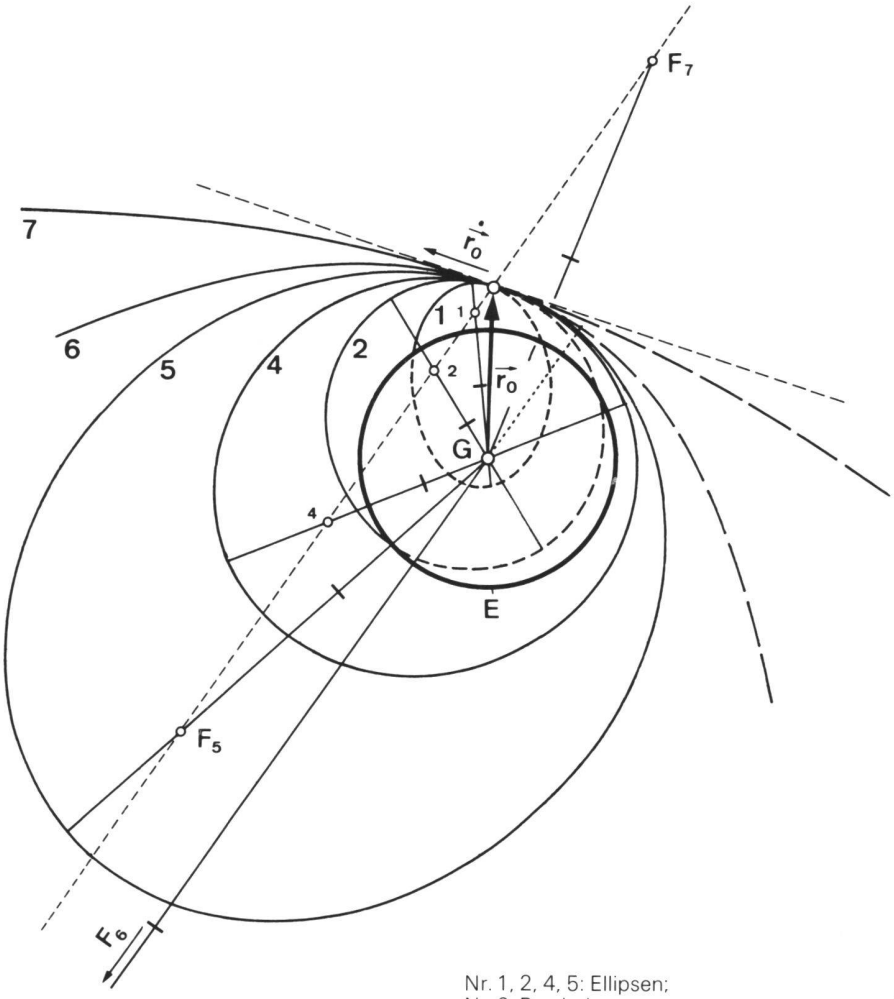
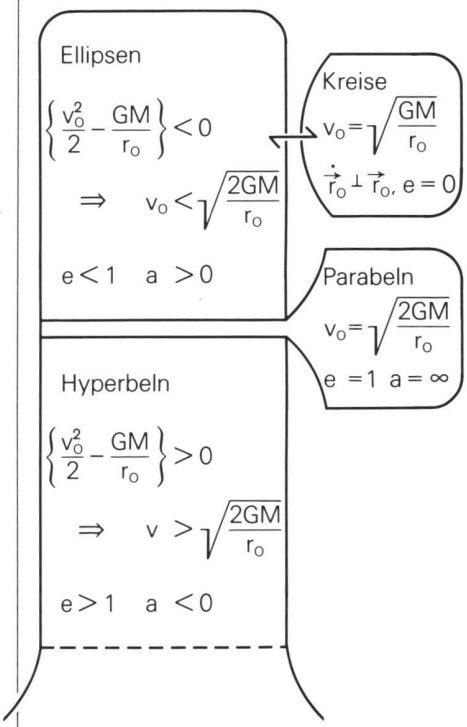


Abb. 7 Bahnkurven für $\dot{\vec{r}}_0$ schief zu $\vec{r}_0$

Nr. 1, 2, 4, 5: Ellipsen;
Nr. 6: Parabel;
Nr. 7: Hyperbel.



Tab. 2 Keplersche Satellitenbahnen

Der Quotient des dritten Keplerschen Gesetzes, Quadrat der Umlaufzeit durch dritte Potenz der grossen Halbachse, beträgt für Erdsatelliten mit $m = 1 \ll M$ ca. $2{,}75 \cdot 10^{-8}$ min^2 km^{-3}. Demnach ist:

$$U \approx 1.66 \cdot 10^{-4} a^{\frac{3}{2}} \quad U \text{ in [min]} \quad a \text{ in km}$$

$$v_{Mittel} \approx 2.27 \cdot 10^{6} a^{-\frac{1}{2}} \quad v \text{ in [km h}^{-1}\text{]} \tag{7}$$

Im Modellfall der Keplerschen Bewegung muss ein geostationärer Satellit in der Äquatorebene umlaufen, $i_0 = 0$, und eine Umlaufzeit haben, die derjenigen der Erde entspricht, nämlich ein Sterntag mit rund 23 h 56 min 45 s. Für alle Punkte der Erde, für die der Satellit sichtbar ist, steht er dauernd im selben Azimut und Höhenwinkel über dem Horizont. Der sog. Sub-Satellitenpunkt ist immer der selbe Ort auf dem Äquator; hier steht der Satellit im Zenit.

Gemäss [12] war die geostationäre Bahn im Herbst 1984 mit 89 Satelliten besetzt, allerdings mit dem Hinweis, dass wegen unsicheren Angaben über sowjetische Satelliten die Anzahl wahrscheinlich höher liegt. Die zivilen Zwekke, denen diese Satelliten dienen, umfassen vor allem:

- Meteorologie; z. B. Wetter- und Klimaforschung, Wettervorhersage und
- Kommunikationswesen

Das Total aller bisher gestarteten amerikanischen und sowjetischen Satelliten wird rund 3000 betragen.

6.2 Die gestörte Satellitenbewegung

Die idealen Annahmen von Ziffer 6.1, die zu ebenen Keplerschen Ellipsenbahnen führen, werden ergänzt:

Verfeinertes kinetisches Modell

- Das Gravitationspotential der schalenförmigen, kugelsymmetrischen Massenverteilung wird ergänzt durch die sog. Störfunktion R'. Sie ist das Potential aller Gravitationskräfte, die ihre Ursache in der Erdabplattung, der Abweichung von der Rotationsform und in Unregelmässigkeiten der Massenverteilung haben. R' wird als Kugelfunktionsentwicklung mit den harmonischen Koeffizienten Jnm, Knm dargestellt
- Gravitationskräfte von Sonne und Mond, Widerstand in der Hochatmosphäre, Strahlungsdruck(kraft) der Lichtquanten der Sonnenstrahlung; alle diese Einflüsse sollen hier mit dem Buchstaben C als sog. Korrekturglieder zusammengefasst werden.

Lösung

Die Störkräfte verursachen zeitliche Veränderungen der Bahnelemente, nicht periodische säkulare Änderungen, kurzperiodische Änderungen mit Perioden von Bruchteilen eines Umlaufs und langperiodische mit Perioden von mehreren Vielfachen von Umläufen.

Die Bewegungsgleichung (2) lautet unter Berücksichtigung der geogravitativen Störkräfte nun

$$\ddot{\vec{r}}_s(t) = -\frac{GM}{r_s^2(t)} \cdot \frac{\vec{r}_s(t)}{r_s(t)} + \text{grad}\, R' \tag{8}$$

Die Lösung von (8) kann unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einflüsse der lunisolaren gravitativen und der nicht gravitativen Störkräfte in allgemeiner Art angeschrieben werden und stellt den geozentrischen Ortsvektor des Satelliten S dar.

$$\vec{r}_s(t) = \vec{r}_s \Big\{ [a_0 + a(t, GM, Jnm, Knm)], [e_0 + e(t \ldots)], [\Omega_0 + \Omega(t \ldots)], [i_0 + i(t, \ldots)], [\omega_0 + \omega(t, \ldots)], [T_0 + T(t, \ldots)] \Big\} + \vec{C}(t) \tag{9}$$

Als Satellitenbahn wird die Einhüllende aller sog. oskulierenden Keplerschen Ellipsen bezeichnet, die durch die mit (9) für jeden Augenblick t gegebenen Bahnelemente a, e, Ω, i, ω, T bestimmt werden.

Die vektorielle Differentialgleichung 2. Ordnung (8) kann numerisch oder algebraisch gelöst werden. Dazu wird das raumfeste Koordinatensystem (X_γ, Y_γ, Z_γ) gewählt und (8) in ein System von sechs gewöhnlichen skalaren homogenen Differentialgleichungen 1. Ordnung übergeführt.

Daraus ergeben sich analog zu (5) die Komponenten der allgemeinen Darstellung von (9).

Masse	Name Bezeichnung Land	Start Jahr	Umlaufzeit	Perigäum (über Erdoberfläche)	Apogäum (über Erdoberfläche)	Bahnneigung zum Äquator	Zweckbestimmung Bemerkungen
kg			min	km	km	o	
84	Sputnik I UdSSR	1957	96	225	945	65	Erster Funk- und Messsatellit
70	Echo I USA	1960	118	1 515[5]	1 695[5]	47	Ballonsatellit, ⌀ 30 m, Plastikhülle. Passive Fernmeldestation; von Auge sichtbar. Bahnhöhen sehr stark veränderlich
	Wostok I UdSSR	1961	89	180	325	65	Erstes bemanntes Raumschiff
	Early Bird USA	1965	1436 ≈1 d	35 000	36 585	0	Intelsat I. Geostationärer Fernmeldesatellit
57	Pageos	1966		4 210	4 270	87	Ballonsatellit, ⌀ 30 m, aluminiumbeschichtet. Zielpunkt für geodätische Richtungsmessungen
411	Lageos	1976		5 830	5 945	110	Kugelförmig, ⌀ 60 cm, 426 Tripelprismen ⌀ 4 cm. Zielpunkt für geodätische Laser-Distanzmessungen
50–130	Transit USA	erste 1963	106	1 100	1 100	90	Navigationssystem
	Navstar-GPS	erste ca. 1975	720	26 600	26 600	55	Navigationssystem 6 Bahnebenen

Tab. 3 Typische Bahnen von Erdsatelliten

[5] Werte nach Start

$$\vec{r}_s(t): \begin{pmatrix} X_\gamma(a_o, e_o, \Omega_o, i_o, \omega_o, T_o, t, Jnm, Knm) + C_{X_\gamma} \\ X_\gamma(a_o, e_o, \Omega_o, i_o, \omega_o, T_o, t, Jnm, Knm) + C_{Y_\gamma} \\ X_\gamma(a_o, e_o, \Omega_o, i_o, \omega_o, T_o, t, Jnm, Knm) + C_{Z_\gamma} \end{pmatrix} \qquad (10)$$

mit

$$\alpha_s = \operatorname{arc\,tg} \frac{Y_{\gamma_s}}{X_{\gamma_s}} \qquad \delta_s = \operatorname{arc\,tg} \frac{Z_{\gamma_s}}{\sqrt{Y_{\gamma_s}^2 + X_{\gamma_s}^2}}$$

7. Über geodätische Satellitenmesstechniken

Das vorhergehende Kapitel über Satellitenbewegungen, die Betrachtung der Abbildungen 2–6 und dieser Abschnitt bringen am Beispiel der Satellitengeodäsie die enge Verflechtung der physikalischen und der geometrischen Komponente der Geodäsie besonders gut zum Ausdruck. Die physikalischen Eigenschaften des Gravitationsfeldes der Erde bestimmen die Form der Satellitenbahnen und zusammen mit der Erdrotation die Figur des Erdkörpers. Mit geometrischen Messungen werden einerseits geometrische Grössen und andererseits physikalische Parameter des Erdkörpers oder der Satellitenbahnen bestimmt.

7.1 Die grundlegenden Beobachtungsgleichungen

Das funktionale Modell der Beobachtungsgleichungen bringt gegebene Grössen, beobachtete Grössen und gesuchte Parameter in einen funktionalen Zusammenhang. Dieser lautet in vektorieller Schreibweise, s. Abbildung 4

$$\vec{r}_P + \underline{R}(\Theta_{Gr}) \cdot \vec{s} - \underline{R}(\Theta_{Gr}) \vec{r}_s(t) = 0 \qquad (11)$$

Als gemeinsames Koordinatensystem ist das erdfeste (X, Y, Z)-System gewählt. Da die Grössen $\vec{s}$, $\vec{r}_s(t)$ im raumfesten (X_γ, Y_γ, Z_γ)-System definiert sind, müssen sie mit der Drehmatrix $\underline{R}(\Theta_{Gr})$ der Sternzeit von Greenwich ins erdfeste System transformiert werden.

$$\begin{pmatrix} X(a_E, e_E, h_P, \lambda_P, \Phi_P) \\ \vec{r}_P : Y(a_E, e_E, h_P, \lambda_P, \Phi_P) \\ Z(a_E, e_E, h_P, \lambda_P, \Phi_P) \end{pmatrix}$$

$$+ \underline{R}(\Phi_{Gr}) \cdot \begin{pmatrix} \Delta X_\gamma(|s|, \alpha^*, \delta^*) \\ \vec{s} : \Delta Y_\gamma(|s|, \alpha^*, \delta^*) \\ \Delta Z_\gamma(|s|, \alpha^*, \delta^*) \end{pmatrix} \qquad (12)$$

$$- \underline{R}(\Phi_{Gr}) \begin{pmatrix} X_\gamma \text{ (siehe 10))} \\ \vec{r}_s(t) : Y_\gamma \text{ (siehe 10))} \\ Z_\gamma \text{ (siehe 10))} \end{pmatrix} = 0$$

Verzeichnis der Parameter zu Formel (12) einschliesslich (10)

a_E, e_E	Geometrische Parameter eines geeigneten Erdellipsoids
λ_P, Φ_P, h_P	Geometrische, ellipsoidische Koordinaten des Stationspunktes
a, e, Ω, i, ω, T	Parameter der Satellitenbahn
GM, Jnm, Knm	Physikalische Parameter der Masse, der Masseverteilung bzw. des Gravitationsfeldes der Erde
$\lvert s\rvert$, $\Delta\lvert s\rvert$, α^*, δ^*	Geometrische Messgrössen; $\Delta\lvert s\rvert$ siehe Ziffern 7.2, 7.3, 7.4
t, N_{jq}	Physikalische Messgrössen; N_{jq} siehe Ziffer 7.4
C	Physikalische Störeffekte sowie Einfluss der astronomischen Refraktion auf Richtungsänderungen nach Sternen bzw. zum Satellit. Einfluss der atmosphärischen Refraktion auf die Distanzmessungen in Form von Weg- und Geschwindigkeitsänderungen

Je nach der Aufgabenstellung erfolgt mit dem stochastischen Modell die Zuteilung zu den Kategorien:
- Gegebene, konstante Grössen oder
- Messwerte von Zufallsgrössen oder
- gesuchte Parameter.

Im einen Extremfall können bei genügend grosser Redundanz alle Grössen als gesuchte Parameter betrachtet und bestimmt werden. Die dabei entstehende Singularität ist auf geeignete Weise zu beseitigen.
Im anderen Extremfall, der Navigation, sind

λ_P, Φ_P, h_P	Gesuchte geometrische Parameter
$\lvert s\rvert_i$, t_i	Geometrische und physikalische Messgrössen; i : 1 bis n
α^*_i, δ^*_i	Nicht interessierende unbekannte Parameter
	Alle übrigen sind gegebene konstante Grössen.

Zur numerischen Berechnung

Für die numerische Lösung der impliziten, transzendenten Beobachtungsgleichungen (12) werden diese in der Umgebung von Näherungslösungen für alle unbekannten Parameter linearisiert. Für Optimierungen durch Ausgleichung entsteht daraus für jede beobachtete Grösse eine lineare Verbesserungsgleichung. Die Verbesserungsgleichungen für Beobachtungen der Art $\Delta|s|$ werden durch Differenzbildung der Verbesserungsgleichungen der einzelnen $|s|$ gewonnen.

7.2 Richtungsmessungen

Messgrössen sind lotunabhängige, topozentrische Rektaszension und Deklination und die Zeit α^*, δ^*, t, s. Abbildung 4, Formel (12). Messinstrumente: ballistische Kameras (Horizontsystem), astronomische Kameras mit parallaktischer Montierung (Äquatorsystem), Orbitalkameras (Satellitenbahnsystem).
Messobjekte sind Lichtblitze aktiver Satelliten, an geeigneten Satelliten reflektiertes Licht eines Beleuchtungslasers, an Ballonsatelliten reflektiertes Sonnenlicht.
Die Bildspuren des Satelliten und der Fixsterne werden auf Photoplatten ausgemessen und daraus mit astrometrischen Interpolations- oder photogrammetrischen Verfahren die Messwerte berechnet.
Derart beobachtete topozentrische Richtungen nach Satellitenpositionen bestimmen die Form von geodätischen Netzen. Die metrischen Grössen werden mit terrestrischen oder/und Satellitendistanzmessungen eingeführt. Mit solchen, allerdings simultanen, Beobachtungen von zwei oder mehr Stationen wurde das erste Weltnetz bestimmt [13].

7.3 Distanzmessungen

Die Ausführungen in diesem Abschnitt stützen sich auf [10], [14], [15], [16].
Messgrössen sind topozentrische Distanzen $|s|$ und Distanzdifferenzen $\Delta|s|$ zu geodätischen und Navigationssatelliten, s. Abbildung 4, Formel (12).
Distanzmessungen sind im Vergleich mit Richtungsmessungen für die Navigation von viel grösserer oder sogar alleiniger Bedeutung. Die Messung und Berechnung kann mit ausschliesslich elektronischen Geräten vollständig automatisch durch jedermann erfolgen. Wenn simultan zu mehreren Satelliten gemessen wird, ist ohne weiteres verständlich, dass sich für die mehrfachen räumlichen Bogenschnitte günstige Konfigurationen ergeben. Das selbe gelingt aber auch mit nur einem Satelliten. Ein solcher habe eine polare Umlaufbahn mit einer Umlaufzeit von rund 100 Min. und bewege sich während ca. 20 Min. über dem Horizont der Beobachtungsstation P. Wenn beim i-ten und i + 4-ten Umlauf je zwei Distanzen in einem Zeitintervall von je ca. 6 Min. gemessen werden, so bilden die geometrischen Verbindungsstrahlen von P nach den jeweiligen Satellitenor-

ten eine vierseitige Pyramide mit P als Spitze und ungefähr rechten Kantenwinkeln. Natürlich könnten in diesem grossen Zeitraum noch viel mehr Distanzen gemessen werden.

7.3.1 Laufzeitmessung mit Laserimpulsen

Es gibt stationäre und mobile Impulslasermessanlagen. Die Satelliten sind mit Tripelprismenreflektoren ausgerüstet. Die Anlagen zeichnen sich durch grosse Fernrohre, hohe Impulsleistungen von mehreren hundert Megawatt, durch kurze Impulse von wenigen Nanosekunden entsprechend ca. 0,2 bis 1 m und hochpräzise Zeitmessung aus.
Charakteristische Gleichung zur Ermittlung der beobachteten Strecke:

$$|s| = \bar{v} \cdot \frac{t_L}{2} \qquad (13)$$

$\lvert s \rvert$	Länge des topozentrischen Beobachtungsvektors
$\bar{v}$	Mittlere Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit längs des Messwegs
t_L	Gemessene Laufzeit hin und zurück

7.3.2 Phasenmessung mit modulierten Trägerwellen im Meter- und Submeterbereich

Zum Beispiel beim Secor-Verfahren wird eine frequenzmodulierte Trägerwelle vom terrestrischen Messgerät abgestrahlt und vom Transponder im Satelliten auf zwei verschiedenen Trägerfrequenzen zurückgesendet. Messprinzip ist die Phasenmessung mit sehr grosser Wiederholungszahl zwischen den abgestrahlten und zurückgesandten Signalen. Die Mehrdeutigkeit des Distanzmessresultats bei der Phasenmessung mit nur einer Modulationsfrequenz kann auf verschiedene Arten behoben werden.
Bei Mikrowellenverfahren werden die Modellfehler wegen Refraktion in der Troposphäre mit einem Atmosphärenmodell und die ionosphärischen Einflüsse durch Messung mit zwei Trägerfrequenzen erfasst.
Charakteristische Gleichung zur Ermittlung der beobachteten Strecke:

$$|s| = \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{v}}{f_M} \left(n_M + \frac{p}{2\pi} \right) \qquad (14)$$

$\lvert s \rvert$	Länge des topozentrischen Beobachtungsvektors
$\bar{v}$	Mittlere Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit längs des Messwegs
f_M	Modulationsfrequenz
n_M	Anzahl ganzer Perioden der Modulationsfrequenz
p	Gemessene Phasenverschiebung zwischen abgestrahlten und zurückkehrenden Signalen

7.3.3 Pseudoentfernungsmessung mit PRN-Modulationssequenzen

Die Satelliten sind mit hochpräzisen Oszillatoren ausgestattet, die u. a. eine Systemzeit generieren. Die Art der Satellitensignale – die Trägerfrequenzen und deren Modulation einerseits mit dualen Signalsequenzen und andererseits mit Bahn- und Uhrdaten – ist in Ziffer 3.4 beschrieben. Im Messgerät auf der terrestrischen Station wird ein gleiches Referenzsignal erzeugt. Messprinzip ist die Messung der einfachen Laufzeit durch Kreuzkorrelation der empfangenen PRN-Sequenzen mit den Referenzsignalen. Daraus ergibt sich der Messwert.
Bei gleichzeitiger Messung, die nicht streng simultan sein muss, der $|s|$-Werte zu mindestens vier Satelliten wird die Echtzeitnavigation möglich. Dabei werden λ_P, Φ_P, h_P des stationären oder bewegten Stationspunktes bestimmt, s. Formel (12) sowie die notwendige Synchronisationskorrektur der Empfängerzeitbasis mit der Systemzeit der Satelliten.
Charakteristische Gleichung zur Ermittlung der beobachteten Strecke:

$$|s| = \bar{v}\,(t_L + \Delta t_o) \qquad (15)$$

$\lvert s \rvert$	Länge des topozentrischen Beobachtungsvektors
$\bar{v}$	Mittlere Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit längs des Messwegs
t_L	Gemessene Laufzeit für einen Weg
Δt_o	Synchronisationskorrektur (-verbesserung) der Empfängerzeitbasis auf die Satelliten-Systemzeit

7.3.4 Phasenmessung mit Trägerfrequenzen

Diese Methode hat sowohl Ähnlichkeiten mit der Methode Ziffer 7.3.2 als auch mit der Methode Ziffer 7.3.3.
Gemessen wird eine Phasendifferenz, also keine Laufzeit. Der Phasenvergleich erfolgt nicht zwischen dem abgestrahlten und wieder empfangenen modulierten Signal, sondern zwischen der im Satelliten erzeugten mit der Systemzeit synchronen Trägerwelle und der analogen im Messgerät auf der terrestrischen Station erzeugten Frequenz. Die Mehrdeutigkeit der Bestimmung von $|s|$, nämlich der unbekannten ganzen Anzahl von Trägerfrequenzwellenlängen, muss mit einer geeigneten Methode behoben werden. Das Auflösungsvermögen und die Genauigkeit sind entsprechend der hohen Trägerfrequenz sehr hoch. Allerdings tritt auch hier als zusätzlicher unbekannter Parameter die Synchronisationskorrektur zwischen der Zeitbasis im Empfänger und der Systemzeit im Satelliten auf.
Charakteristische Gleichung zur Ermittlung der beobachteten Strecke:

$$|s| = \frac{\bar{v}}{f_{Tr}} \left(n_{Tr} + \frac{p}{2\pi} \right) + \bar{v} \cdot \Delta t_o \qquad (16)$$

$\lvert s \rvert$	Länge des topozentrischen Beobachtungsvektors
$\bar{v}$	Mittlere Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit längs des Messwegs
f_{Tr}	Frequenz der Trägerwelle
n_{Tr}	Anzahl ganzer Perioden der Trägerfrequenz
p	Gemessene Phasenverschiebung der Trägerwelle
Δt_o	Synchronisationskorrektur (-verbesserung) der Zeitbasis im Empfänger auf die Satelliten-Systemzeit

7.4 Entfernungs-Differenzmessung mit der Dopplermethode

Es wird die Streckendifferenz $|s| = |s_q| - |s_j|$ der Strecken $|s|$ des terrestrischen Beobachtungsvektors $\vec{s}$ zum Satelliten zu den Zeitpunkten t_j und t_q gemessen, s. Abbildungen 8, 9[5]. Dies erfolgt mit dem sog. Dopplercount N_{jq}. Dieser dimensionslose Messwert ist das Zeitintegral zwischen den Zeitpunkten j und q der Dopplerfrequenz. Aus N_{jq} kann $|\Delta s|$ berechnet werden. Doppler-Satellitenempfänger vollziehen die Messung einschliesslich der Berechnung der Koordinaten h_P, λ_P, Φ_P, s. Formel (12), automatisch. Während des Durchgangs eines Satelliten über dem Horizont werden mehrere Dopplercounts N_{jq} bestimmt, wobei das Zeitintervall $t_q - t_j$ je nach Empfänger in der Grössenordnung von wenigen Sekunden bis Minuten liegt. Der Satellit sendet Modulationssignale mit Informationen über die Bahnparameter aus sowie zwei ver-

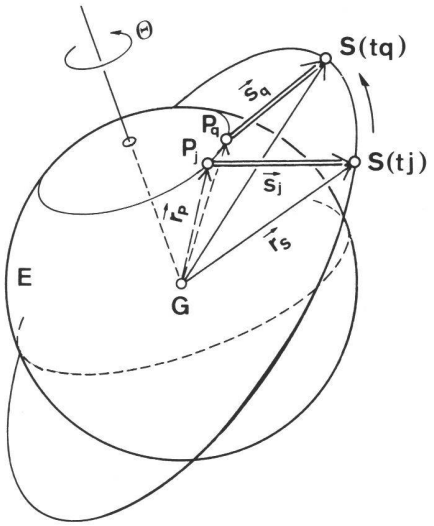


Abb. 8 Doppler-Distanzdifferenzmessung im raumfesten System betrachtet. Vgl. Abbildung 4.

[5] An dieser Stelle wird erwähnt, dass hier wirklich nur vom Prinzip gesprochen wird. Jedes einzelne Verfahren umfasst ein umfangreiches Gebiet an theoretischen Grundlagen, Messtechnologie, Auswertetechnik.

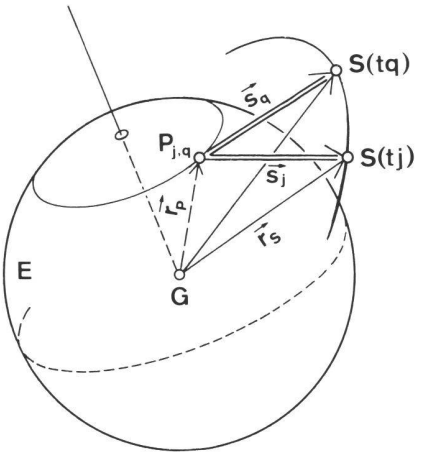


Abb. 9 Doppler-Distanzdifferenzmessung im erdfesten System betrachtet. Vgl. Abbildung 4.

schiedene Frequenzen zur Bestimmung von Refraktionskorrekturen. Zu Beobachtungs- und Verbesserungsgleichung für die Grössen $|\Delta s| = |s_q| - |s_j|$ s. Ziffer 7.1, letzter Abschnitt über die numerische Berechnung.
Gleichung (17) ist die Näherungsformel für die Dopplerfrequenzverschiebung Δf und gilt für $|\dot{s}| \ll \bar{v}$. Die Gleichungen (17), (18) sind z. B. in [8], [16] hergeleitet.

$$\Delta f = f_P - f_S = -\frac{f_S}{\bar{v}} \cdot |\dot{s}| \qquad (17)$$

$$N_{jq} = \int_{t_j}^{t_q} (f_G - f_P)\,dt$$

$$|\Delta s| = \{|s_q| - |s_j|\} \qquad (18)$$

$$= \frac{\bar{v}}{f_G} \{N_{jq} - (f_G - f_S)\,(t_q - t_j)\}$$

f_P	Auf dem Stationspunkt P empfangene Frequenz
f_S	Vom Satelliten abgestrahlte Frequenz
f_G	Geräte-Referenzfrequenz des Satellitenempfängers ($f_G - f_P$): Eigentliche Messgrösse
$\lvert s \rvert$	Distanz vom Stationspunkt P zum Satelliten S
$\lvert \dot{s} \rvert$	Geschwindigkeit der Veränderung von $\lvert s \rvert$
$\lvert \Delta s \rvert$	‹Gemessene› Streckendifferenz
$\bar{v}$	Mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen längs des Messweges
N_{jq}	sog. integrierter Dopplercount
t_j, t_q	Zeitpunkte. Eigentliche Messgrössen

7.5 Translokations-, Short-Arc-Methoden

Als Translokationsverfahren wird die simultane Anwendung einer Messmethode auf zwei oder noch mehr terrestrische Stationen mit gegenseitigen Entfernungen von bis zu 1000 km und gemeinsamer Auswertung bezeichnet.
Es gibt dann Beobachtungsgleichungen von der Art (11) bzw. (12), in denen als unbekannte Parameter die ellipsoidischen Koordinaten h_P, λ_P, Φ_P von zwei oder mehreren Punkten P vorkommen. Wenn diese im selben Ausgleichungsprozess bestimmt, geschätzt werden, so ist die Genauigkeit der relativen räumlichen Lage dieser Punkte ganz wesentlich besser als die Genauigkeit der ‹absoluten› räumlichen Lage des einzelnen Punktes im erdfesten (X, Y, Z)-System. Die Ursache liegt in der starken Korrelation der Beobachtungen, oder m. a. W., bei der Bestimmung der relativen Lage benachbarter Punkte entfallen systematische Modellfehler weitgehend, insbesondere solche der Satellitenbahnkoordinaten und der Refraktion.
Short-Arc-Modelle umfassen das eben geschilderte Translokationsverfahren simultan auf vielen terrestrischen Stationen sowie, wenn die Redundanz der Konfiguration des Netzes genügend gross ist, die Einführung einzelner oder aller Bahnelemente für das oder die verwendeten Teilstücke der Satellitenbahn als unbekannte Parameter. Je nachdem wird das System der linearisierten Beobachtungsgleichungen (12) dann singulär; diese freie Ausgleichung ist auf geeignete Weise zu lösen.

7.6 Interferometrische Distanzdifferenzmessung

Diese Verfahren können als die Anwendung der VLBI-Messtechnik bei der Satellitengeodäsie betrachtet werden. Bisweilen wird auch die Messtechnik gemäss Ziffer 7.3.3 als interferometrisches Verfahren bezeichnet.
Es gibt hier z. T. Ähnlichkeiten mit dem Verfahren gemäss Ziffer 7.5 und z. T. gemäss Ziffer 7.3.3. Wie beim Verfahren gemäss Ziffer 7.3.3, werden die der (den) Trägerfrequenz(en) aufmodulierten Navigationscodes auch hier als PRN-Sequenzen betrachtet, die u. a. auch die Information über die Systemzeit enthalten. Ähnlich wie beim Verfahren Ziffer 7.5 werden die Signale simultan auf zwei oder evtl. mehr Stationen aufgezeichnet. Anschliessend werden diese Aufzeichnungen einer Korrelationsprozedur unterzogen und daraus die Signal-Laufzeitdifferenz ermittelt zwischen den Wegen vom momentanen Satellitenort S zu den zwei oder mehreren terrestrischen Stationspunkten P bzw. Q und daraus $|\Delta s_{PQ}| = |s_Q| - |s_P|$, s. Abbildung 10. Unbekannter Parameter ist $\vec{\Delta r}_{PQ}$. Zu Beobachtungs- und Verbesserungsgleichung für die gemessenen Grössen $\Delta|s| = |s_Q| - |s_P|$ s. Ziffer 7.1, letzter Abschnitt über die numerische Berechnung.

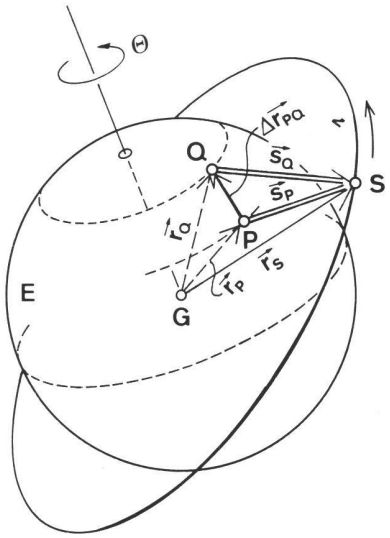


Abb. 10 Distanzdifferenzmessung mit dem sog. Interferenzverfahren.

Die Idee und die Entwicklung der Anwendung der VLBI-Technik in der Satellitengeodäsie zur Erreichung ausserordentlich hoher Genauigkeiten, selbst wenn die Bahnelemente der Satelliten nur mit vergleichsweise niedriger Genauigkeit vorliegen, geht auf das Jahr 1972 [17] zurück und ist seit 1978 mit dem Namen C. C. Counselmann verbunden [18].
Charakteristische Gleichung zur Ermittlung der Streckendifferenz:

$$|\Delta s_{PQ}| = |s_Q| - |s_P| = \bar{v} \cdot \Delta t_{L,PQ} + (\Delta t_{oQ} - \Delta t_{oP}) \qquad (19)$$

$\lvert \Delta s_{PQ} \rvert$	Differenz der Länge der beiden topozentrischen Beobachtungsvektoren $\vec{s}_Q$, $\vec{s}_P$
$\bar{v}$	Mittlere Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit längs des Messwegs
$\Delta t_{L,PQ}$	Gemessene Laufzeitdifferenz
Δt_{oP}, Δt_{oQ}	Synchronisationskorrekturen (-verbesserungen) der Empfängerzeitbasen in P und Q zur Satelliten-Systemzeit

7.7 Differentialverfahren

Die dargestellten Verfahren, Translokation und Interferometrie, sind gegenüber anderen dadurch gekennzeichnet, dass immer mindestens zwei terrestrische Stationen gleichzeitig besetzt sind. Die Vorteile dieses Prinzips, s. Ziffer 2.4, können für alle Methoden ausgenützt werden, wenn es im Lauf der Zeit, überall dort, wo das für die Anwendung wichtig ist, permanente Messanlagen gibt, z. B. auf Flugplätzen, zentralen nationalen Basispunkten. Damit wird es möglich sein, integrierte Korrektionsparameter für beliebige Methoden zu gewinnen, mit denen die mit transpor-

	Ziff. Nr.	Beobachtete Grössen	$\sigma \div 2\sigma$ ca.	Erläuterungen
Richtungsmessungen	7.2	α^*, σ^*	$0.5-3^{cc}$	
Impulslasermessanlagen	7.3.1	$\lvert s \rvert$	$\approx 0{,}1$ m	
Phasenmessung mit modulierten Trägerwellen im Submeterbereich	7.3.2	$\lvert s \rvert$	3 m	
Pseudoentfernungsmessung mit PRN-Modulationsfrequenzen	7.3.3	$\lvert s \rvert$	wenige m	
Navigation		λ_P, Φ_P, h_P	30 m	Navigation mit SPS-Code
		λ_P, Φ_P, h_P		Navigation mit PPS-Code
Phasenmessung mit Trägerfrequenzen	7.3.4	$\lvert s \rvert$	wenige cm	
Entfernungsdifferenzmessung mit Dopplermethode	7.4	$\Delta\lvert s \rvert = \lvert s_{PSq} \rvert - \lvert s_{PSj} \rvert$	wenige m	P: eine terrestrische Messstation S_j, S_q: zwei Satellitenorte
		λ_P, Φ_P, h_P	3 m	Punktbestimmung
Translokationsverfahren Short-Arc-Verfahren	7.5	$\Delta\lambda_{PQ}, \Delta\Phi_{PQ}, \Delta h_{PQ}$	wenige dm[7]	P, Q: zwei terrestrische Messstationen S_j, S_q: zwei Satellitenorte
Distanzdifferenzen mit Interferenzverfahren	7.6	$\Delta\lvert s \rvert = \lvert s_{QS} \rvert - \lvert s_{PS} \rvert$	Grössenordnung cm[7]	P, Q: zwei terrestrische Messstationen S: ein Satellitenort
Differentialverfahren	7.7	für Ziffern 7.3.2, 7.3.3, 7.3.4, 7.4	besser als oben angegeben	Permanente Anlagen zur Bestimmung von integrierten Korrektionsparametern

Tab. 4 Satelliten-Messverfahren, Genauigkeit
[7] für relative Lage von Zwei Punkten P, Q in einem erdfesten System

tablen Navigationsgeräten stationär oder dynamisch erhobenen Messwerte, zur massgeblichen Erhöhung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit, mit integrierten Korrektionsgrössen verbessert werden können.

7.8 Besonderes zur Geometrie von Satellitennetzen

Für die Bestimmung von geodätischen Netzen hoher Genauigkeit in der Landesvermessung und der Ingenieurvermessung stellt Abbildung 11 eine mögliche Konfiguration dar.

Gegebene Grössen

P (λ_P, Φ_P, h_P)	Ellipsoidische Koordinaten einiger Netzpunkte P als lokale oder regionale Datumspunkte. Evtl. keine gegebenen Grössen; freie Netzausgleichung

Beobachtete Grössen

S (X Y Z) P (X Y Z) Q (X Y Z)	Positionen aller Satellitenorte und terrestrischen Stationspunkte
$\lvert s_{Pj} \rvert, \lvert s_{Pq} \rvert, \lvert s_{Qj} \rvert, \lvert s_{Qq} \rvert$	Strecken zwischen allen Punkten P und Q und allen Satellitenpositionen S
$\lvert \Delta s \rvert = \lvert s_{Pq} \rvert - \lvert s_{Pj} \rvert$	Streckendifferenzen zwischen einzelnen Punkten P, Q
$\lvert \Delta s \rvert = \lvert s_{Qq} \rvert - \lvert s_{Qj} \rvert$	und je mehreren Satellitenpositionen

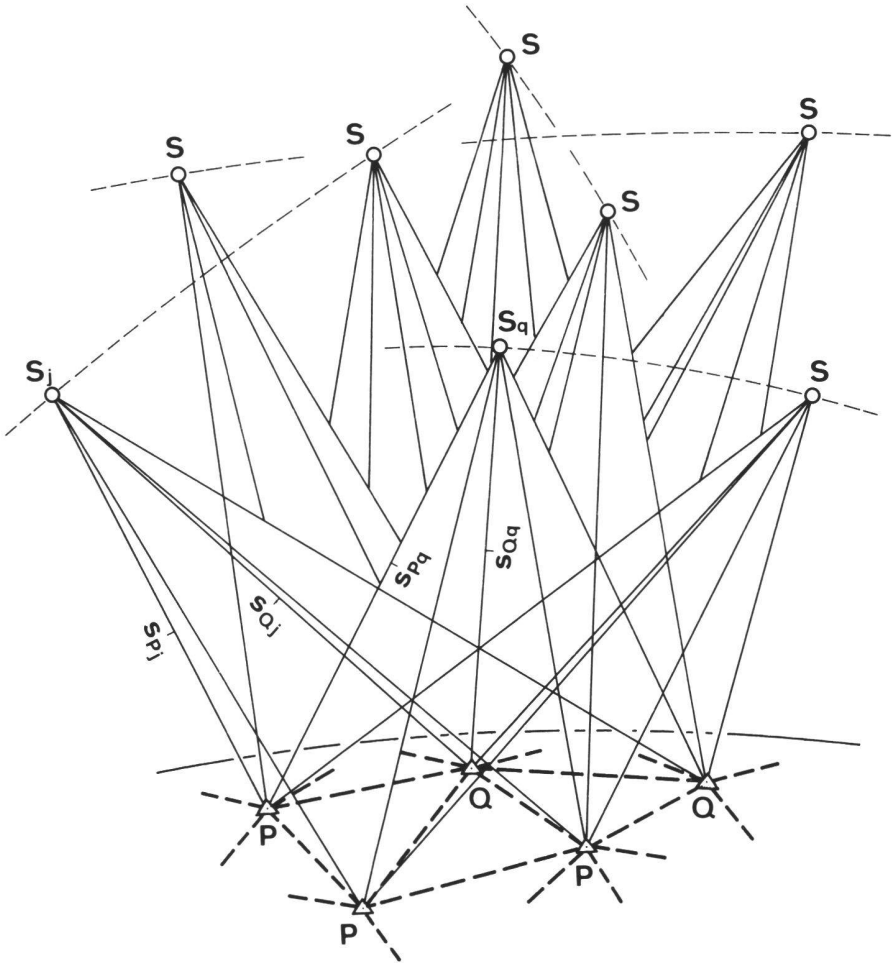


Abb. 11 Netzformen.

$\lvert\Delta s\rvert = \lvert s_{Q_j}\rvert - \lvert s_{P_j}\rvert$	Streckendifferenzen zwischen verschiedenen Punkten P, Q
$\lvert\Delta s\rvert = \lvert s_{Q_q}\rvert - \lvert s_{P_q}\rvert$	und der selben Satellitenposition
$\Delta\lvert\Delta s\rvert = \left\{\lvert s_{Q_q}\rvert - \lvert s_{P_q}\rvert\right\} - \left\{\lvert s_{Q_j}\rvert - \lvert s_{P_j}\rvert\right\}$	Differenzen der Streckendifferenzen zwischen verschiedenen Punkten P und zwei oder mehreren Satellitenpositionen S
	Alle Beobachtungen mit zugehörigem stochastischem Modell; verschiedene Genauigkeiten, Korrelationen

Gesuchte Parameter

Q (X Y Z) bzw. Q (λ_Q, Φ_Q, h_Q)	Raumkoordinaten und ellipsoidische Koordinaten der Netzpunkte Q

Zur Beachtung

Direkte Beobachtungen, d. h. Visuren zwischen Punkten der Art P und Q sind nicht erforderlich. Geodätische Netze weisen als genauigkeitsbestimmende Beobachtungen Streckendifferenzen und Differenzen von Streckendifferenzen auf. Zur zweckmässigen formalen Behandlung ist Tensorkalkül wahrscheinlich nützlich [19].

Literatur

[1] Bossler, John D.: The Impact of VLBI and GPS on Geodesy. EOS, September 1983.

[2] Hoskins, G. W., Danchik, R. J.: Navy Navigation Satellite System Status and Future in [3].

[3] 31 verschiedene Autoren: Global civil satellite navigation systems. Papers presented at the 1984 conference of the Royal Institute of Navigation, London May 1984.

[4] Stansell, Thomas, A. Jr.: Civil GPS from a future Perspective. Points & Positions, Magnavox, Volume 2, Nr. 2, März 1984.

[5] Scull, D. C.: The USA Federal Radionavigation Plan in [3].

[6] Matthias, H. J.: Der Topomat. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik (VPK) 4/82.

[7] Stansell, Thomas, A. Jr.: Meeting the GPS Challenge. Points & Positions, Magnavox, Volume 1, Nr. 2, 3, Februar 1983.

[8] Porter, J., Kruth, P., Sprosen, B.: GPS Navstar System Overview in [3].

[9] Wiget, A., Geiger, A., Kahle, H.-G.: Die Doppler-Messkampagne SWISSDOC: Ein Beitrag zur Landesvermessung in der Schweiz. VPK 2/85.

[10] Torge, W.: Geodesy, an Introduction. Walter de Gruyter, Berlin, New York 1980.

[11] Bohrmann, Alfred: Bahnen künstlicher Satelliten. Bibliographisches Institut Mannheim 1963.

[12] Eidg. Kommission für Weltraumfragen im EDA. Raumfahrt Schweiz. Bericht 1984.

[13] Schmid, H. H.: Konzeptionelle und fehlertheoretische Betrachtungen zur Erstellung eines geodätischen Weltsystems mit Hilfe der Satellitengeodäsie. VPK 4/72.

[14] Seeber, G.: Die Rolle des Navstar Global Positioning Systems für die Lösung geodätischer Aufgaben. Zeitschrift für Vermessungswesen 1/84.

[15] Seeber, G.: Satelliten-Dopplerpositionsbestimmung, eine Einführung. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 7/82.

[16] Geiger, A., Kahle, H.-G.: Zum Dopplerverfahren in der Satellitengeodäsie: ein Überblick. VPK 6/82.

[17] Hinteregger, H. F., Shapiro, I. I., Robertson, D. S., Knight, C. A., Ergas, R. A., Whithney, A. R., Rogers, A. E. E., Moran, J. M., Clark, R. A., and Burke, B. F.: Precision Geodesy via Radio Interferometry. Science, Vol. 178, Oct. 27, 1972.

[18] Counselmann, C. C., Shapiro, I. I.: Miniature Interferometer Terminals for Earth Surveying. Proceedings of the 9th Geodesy/Solid Earth and Ocean Physics (GEOP) Research Conference, Oct. 1978 (available as Report 280, Department of Geodetic Science, Ohio State University, Columbus, Ohio).

[19] Vanicek, P., Langley, R. B., Wells, D. E., Delikaroaglon, D.: Geometrical aspects of differential GPS Positioning. Bulletin géodésique Vol. 58, Nr. 1/84.

Bisherige Artikel über Satellitengeodäsie in VPK

- Schürer, M.: Satellitengeodäsie. VPK 10/66.
- Rüeger, J. M.: Geodätische Ortsbestimmung mit tragbaren Doppler-Empfängern von Satellitensignalen. VPK 2/75.
- Bauersima, I.: Wissenschaftliche Problemstellung der Satellitengeodäsie. VPK 2/78.

sowie

- [9], [13], [16].

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr. H. J. Matthias
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

Abbildungen: W. Schneibel

SGP/SSP

Schweizerische Gesellschaft für Photogrammetrie
Société suisse de photogrammétrie

Einladung zur 58. Hauptversammlung

Zeit: Samstag, 4. Mai 1985, 11.00

Ort: Photogrammétrie EPFL, Gebäude GR, Hörsaal GRA 31, Lausanne-Ecublens

Bustransport Bahnhof Lausanne–Ecublens: Abfahrt 10.30 gegenüber dem Haupteingang der Bahnhofshalle (Ankunft von Bern 10.22). Parkplätze sind genügend vorhanden.

Traktanden

1. Protokoll der Herbstversammlung 1984 in Zürich
2. Tätigkeitsbericht des Vorstandes
3. Rechnungsbericht und Abnahme der Jahresrechnung
4. Festsetzung des Jahresbeitrages und Budget 1984/85
5. Wahlen
6. Informationstagung ‹Luftbilder in der Schweiz›
7. Herbstversammlung 1985, Hauptversammlung 1986
8. Verschiedenes

12.00–14.00	Apéritif und Mittagessen im Restaurant ‹Copernicus› der EPFL
14.00–15.00	Vortrag von Prof. Kölbl: ‹Photogrammetrie im Aufwind›
15.00–17.00	Führung in Gruppen durch die neuen Räumlichkeiten mit Schwerpunkt Photogrammetrie, Vermessung und Bildinterpretation (Bodenkunde). Präsentation von laufenden Arbeiten und Untersuchungen
ca. 17.00	Abfahrt per Bus zum Bahnhof (Zug 17.32 nach Bern)

Gäste sind herzlich wollkommen.

Der Vorstand

VSVT/ASTG/ASTC

Verband Schweizerischer Vermessungstechniker
Association suisse des techniciens-géomètres
Associazione svizzera dei tecnici-catastali

55. Generalversammlung mit Fachausstellung und Fachvortrag

3. und 4. Mai 1985 im Alten Gemeindesaal in Lenzburg

Willkommen in Lenzburg!

Die Sektion Aargau freut sich, Sie, liebe Kolleginnen und Kollegen, zur Generalversammlung nach Lenzburg einzuladen.
Neben der traditionellen Fachausstellung findet ein Fachvortrag mit folgendem Thema statt: Automationskette von der Aufnahme bis zum fertigen Plan. Es würde uns freuen,

auch auf Deponien mit geringem Block- und Bauschuttanteil. Durch die Stech-Hub-Wirkung der Scharplatte und den dadurch kleineren Zugkraftbedarf schafft die Maschine grosse Flächenleistungen von ca. drei ha pro Tag bei einer Lockerungstiefe von gut 80 cm.

Der Raupentraktor mit dem stufenlos verstellbaren Schar kann ebenfalls bei harten Bedingungen eingesetzt werden. Hingegen sind mehr als zwei Durchgänge erforderlich, um annähernd das Lockerungsergebnis der dreischarigen Moorraupen zu erreichen. Das Gerät eignet sich weiter für Spezialzwecke:

Falls erforderlich, kann der Boden bis 1,2 m tief aufgerissen oder mit Hilfe des Streichbleches am Schar ein grosser Bodenmischeffekt erzeugt werden.

Die schleppergezogenen Tieflockerer bieten sich für landwirtschaftliche Zwecke (Bodenverdichtungen aus Bewirtschaftung) und für schwach bis mittel verdichtete Auffüllungen an. Bei guten Bedingungen werden Lockerungstiefen von 50–60 cm erreicht, falls ein leistungsstarker Schlepper als Zugfahrzeug eingesetzt wird.

6. Schlussbemerkungen

Vor jeder Tieflockerung muss neben den andern Arbeiten vor allem die erforderliche Lockerungstiefe und der Bodenaufbau erhoben werden. Damit kann bei der Ausschreibung der Gerätetyp gefordert werden, der die erforderlichen Leistungen erbringt.

Aufgrund der Versuche wurde für die eingangs erwähnte Lockerungsarbeit die Moorraupe Cat. D6 C dem eher überlegenen Stechhublockerer vorgezogen, und zwar aus folgenden Gründen:

- Der Werkhof des betreffenden Unternehmers lag nur 10 km von der Rekultivierungsfläche entfernt. Da die Gesamtfläche von 10 ha in mehreren Losen zu lockern war, rechnete man mit tiefen Transportkosten und raschen Installationszeiten.
- Der Stechhublockerer war im Zeitpunkt der Unternehmerwahl defekt und wegen der starken Auslastung ein Einsatz zum gewünschten Termin fraglich.
- Der gewählte Unternehmer bot mit einem grossen Maschinenpark Gewähr für Ersatzfahrzeuge bei Defekten.

Bei der Lockerung setzte der Unternehmer für das erste Los nicht mehr den Cat. D6 C ein, sondern den wesentlich leistungsstärkeren Cat. 983 (32 t, 205 kW).

Dieses Gerät war den Anforderungen gut gewachsen, seine Leistung genügte, um die drei Aufreisserzähne durch den Boden zu ziehen. Als nachteilig muss das grosse Gewicht angemerkt werden. Beim zweiten Lockerungsdurchgang wurde der aufgerissene Boden im Bereich der Raupen sozusagen auf das Ausgangsniveau zusammengepresst, jedoch von den nachfolgenden Aufreissern erneut gelockert.

Beim zweiten Los war der Cat. 983 wegen eines Motorenschadens nicht verfügbar, statt dessen kam ein Bulldozer Cat. D7G mit ca. 150 kW Leistung und 20 t Gewicht zum Einsatz. Im Gegensatz zum Trax zeigte das Gerät im ersten Lockerungsdurchgang Mühe, die drei Zähne bei voller Lockerungstiefe durch den dichten Boden zu reissen. Damit die Zugkraft ausreichte, musste der mittlere Zahn entfernt und konnte erst im zweiten Durchgang wieder eingesetzt werden.

Abb. 9 Cat D7G mit zwei Aufreissern im ersten Durchgang.

Zum Abschluss soll noch angefügt werden, dass die Lockerung eines dichten Bodens *eine von mehreren Voraussetzungen* [3, 1] für die Verbesserung des gestörten Luft- und Wasserhaushaltes darstellt. Danach braucht es jedoch zusätzlich *zu einer angepassten Folgebewirtschaftung vor allem Zeit,* bis sich im Boden ein stabiles Gefüge aufgebaut hat. Eine unsachgemässe Bewirtschaftung nach der Lockerung, z. B. durch den Anbau von Hackfrüchten und Mais oder durch das Befahren des Bodens im nassen Zustand, kann den Stabilisierungsprozess im Boden behindern bis unterbinden.

Die Landwirte sollten mit aller Deutlichkeit darauf hingewiesen werden, dass sie bei gesamten Rekultivierungskosten von Fr. 20 000.– bis Fr. 25 000.–/ha (Drainagen, Tieflockerung und grobe Entsteinung eingerechnet) gewisse Einschränkungen in der Bewirtschaftungsfreiheit erdulden müssen, um den Erfolg des Werkes nicht zu gefährden.

Literatur:

[1] Müller, U: Untersuchungen über die Tieflockerung und ihre praktischen Ergebnisse zur Rekultivierung mechanisch verdichteter Böden. Schweizer Ingenieur und Architekt, 14, 324–328, 1980

[2] Müller, U: Die Melioration staunasser Böden unter besonderer Berücksichtigung der Tieflockerung. Diss. ETHZ Nr. 7225, 1983

[3] Schulte-Karring, H: Die meliorative Bodenbewirtschaftung. Landes-Lehr- und Versuchsanstalt, Ahrweiler 1970

Adresse des Verfassers:
Dr. U. Müller, dipl. Kulturing. ETH
Ingenieurbüro Howald und Wilhelm
CH-8157 Dielsdorf

Korrigenda VPK Nr. 4/85 Navigation

Im Literaturverzeichnis auf Seite 122 wurden alle Beiträge aufgezählt, die bisher über Satellitengeodäsie in der Zeitschrift VPK veröffentlicht wurden. Da es dabei zu einem bedauerlichen Versehen gekommen ist, wiederholen und ergänzen wir wie folgt:

- Schürer, M.: Satellitengeodäsie. VPK 10/66.
- Schmid, H. H.: Konzeptionelle und fehlertheoretische Betrachtungen zur Erstellung eines geodätischen Weltsystems mit Hilfe der Satellitengeodäsie. VPK 4/72.
- Rüeger, J.M.: Geodätische Ortsbestimmung mit tragbaren Doppler-Empfängern von Satellitensignalen. VPK 2/75.
- Bauersima, I.: Wissenschaftliche Problemstellung der Satellitengeodäsie. VPK 2/78.
- Dupraz, H.: La géodésie et les satellites. VPK 6/79.
- Geiger, A., Kahle, H.-G.: Zum Dopplerverfahren in der Satellitengeodäsie: ein Überblick. VPK 6/82.
- Geiger, A., Kahle, H.-G., Reinhart, E., Rösch, K., Schödlbauer, A., Seeger, H.: Etablissement d'un réseau géodésique de premier ordre par mesures Doppler sur satellites en Côte d'Ivoire. VPK 10/84.
- Wiget, A., Geiger, A., Kahle, H.-G.: Die Doppler-Messkampagne SWISSDOC: Ein Beitrag zur Landesvermessung in der Schweiz. VPK 2/85.